

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Estudo de um sistema de iluminação eficiente para
auto-estrada – Caso de estudo do Nó de Évora Poente
da auto-estrada A6

Ricardo Jorge Macedo Leandro

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Estudo de um sistema de iluminação eficiente para auto-estrada – Caso de estudo do Nó de Évora Poente da auto-estrada A6

Ricardo Jorge Macedo Leandro

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Professor Jorge Maia Alves (FCUL)

Doutor Jorge Alves Lopes (BRISA)

Agradecimentos

Ao Professor Jorge Maia Alves, meu orientador nesta dissertação, pelas críticas, sugestões e correções ao trabalho realizado.

Ao Doutor Jorge Lopes pela oportunidade dada de desenvolver este projeto em colaboração com a Brisa Auto-Estradas de Portugal, S.A.

Ao Engenheiro João Rodrigues pelo acompanhamento, dedicação e disponibilidade demonstrados ao longo deste projeto. O seu apoio foi essencial e crucial para a conclusão deste projeto.

Ao Engenheiro Alberto Van-Zeller por todo o apoio especializado, dedicação e trocas de informação durante a fase inicial do projeto. O seu auxílio prestado e as suas opiniões foram muito importantes para o desenvolvimento deste projeto.

Ao Sr. José Belo pelo acompanhamento e explicações durante a primeira visita técnica ao local de estudo. A sua prontidão para esclarecer dúvidas e disponibilizar informações foram importantes para enriquecer tecnicamente o projeto.

Ao Sr. Fernando Castro por todo o apoio, colaboração e empenho durante o processo de medição. O seu acompanhamento e ajuda foram essenciais para a obtenção das medições necessárias à realização do estudo.

À Carolina Vieira e António Sousa pelas informações técnicas disponibilizadas.

À Patrícia Nunes e ao Jorge Rocha pela amizade e ótimo ambiente de trabalho na biblioteca.

Aos meus amigos pelo apoio, motivação, amizade e carinho demonstrados durante toda a vida académica.

À Cátia Aguiar por ser o pilar da minha vida, a minha felicidade e a minha inspiração.

Aos meus pais e irmã, António, Maria e Inês que me incentivaram e me “aturaram” com muita paciência, para além de me terem proporcionado todas as condições necessárias para a conclusão dos meus estudos.

Resumo

Este trabalho pretende ser uma contribuição para o estudo da eficiência energética dos sistemas de iluminação em auto-estradas. Neste contexto, estudou-se o sistema de iluminação instalado no Nó de Évora Poente da auto-estrada A6 numa perspetiva fotométrica, energética e financeira e avaliou-se o impacto de propostas de eficiência energética para a remodelação desse sistema. As propostas apresentadas pretendem conciliar uma diminuição de custos de operação e manutenção por parte da concessionária, com a manutenção de boas condições de iluminação para os utentes, avaliadas no contexto de normas e recomendações europeias.

Os resultados obtidos mostram que os requisitos de luminância e iluminância impostos para este tipo de vias de comunicação pela norma EN13201 não foram observados no projeto luminotécnico do caso de estudo. No entanto, a conformidade com esta norma poderia ser obtida através de duas remodelações: i) Pequena redução da altura das colunas das luminárias e ii) Substituição das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (VSAP) por lâmpadas VSAP com maior emissão de lúmens por watt. Este estudo mostra igualmente que as luminárias VSAP instaladas no local são atualmente as mais adequadas para locais deste tipo, sendo previsível que, havendo uma redução significativa dos seus atuais custos, as luminárias LED possam vir a ser competitivas, sobretudo no caso de projetos de iluminação feitos de raiz.

Relativamente à situação atual, a já referida diminuição das alturas das colunas de suporte e instalação de lâmpadas com maior emissão de lúmens por watt, e a substituição dos balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos, mantendo as luminárias atuais, poderiam permitir, além do cumprimento integral da norma, uma poupança energética de 35%, se fossem efetuadas reduções de intensidade luminosa em períodos de baixo tráfego, à luz do disposto na recomendação CIE115:2010. O período de retorno correspondente a esta substituição dos balastros foi calculado em 2,7 anos. Com a remodelação das armaduras VSAP para LED com regulador de fluxo limitado a 50% de redução de potência luminosa, consegue-se uma poupança energética de 43% com um período de retorno superior a 40 anos.

Ficou claro que, no futuro, a área da iluminação em auto-estradas irá seguramente ser alvo de muitas otimizações de forma a reduzir os custos para as concessionárias e aumentar a segurança durante a tarefa de condução. Assim, este trabalho é um contributo para que se inicie estudos mais aprofundados sobre sistemas de iluminação eficientes para auto-estrada.

Palavras-chave: Iluminação de Auto-estrada; Eficiência Energética; EN13201; CIE115:2010; LED.

Abstract

This work aims be a contribution to the study of energy efficiency of lighting systems on highways. In this context, we studied the lighting system on interchange Évora Poente of the A6 highway at a perspective photometric, energy and financial and evaluated the impact of energy efficiency proposals for the retrofit of that system. The proposals presented intend to combine a decrease in operation and maintenance costs by the utility, while maintaining good lighting conditions for the users, evaluated in the context of European standards and recommendations.

The results show that the requirements of the luminance and illuminance required for this type of road topology, by standard EN13201, were not observed in this project. However, the conformity with this standard could be obtained through two retrofits: i) Slight reduction in height of luminaires columns and ii) Replacement of the high pressure sodium lamps (HPS) by HPS lamps with higher lumen output per watt. This study also shows that the HPS luminaires installed at the site are currently the most appropriate to this location's topology, and it is expected that with a significant reduction in their current costs, LED luminaires may become competitive, particularly for lighting projects made from beginning.

Regarding the current situation, the previous mentioned decrease in the height of luminaires columns and installation of lamps with higher lumen output per watt, and replacing the ferromagnetic ballasts by electronic ballasts, while keeping the current luminaires, could allow, in the addition of full compliance of the standard, an energy saving of 35%, if they were made luminous intensity reduction in periods of low traffic, according to the requirements of the recommendation CIE115: 2010. The payback period corresponding to the replacement of the ballasts was calculated to be 2.7 years. The retrofit of the luminaires HPS to LED with dimmers limited to the 50% reduction in the light output, achieves energy savings of 43% with a payback period exceeding 40 years.

Became clear that, in the future, the lighting on highways will certainly be the target of many optimizations to reduce the costs for utilities and increase safety during the driving task. This work is a contribution to that start deeper studies on efficient lighting systems for highways.

Keywords: Highway lighting; Energy efficiency; EN13201; CIE115:2010; LED

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Organização da dissertação	3
2.	Conceitos Gerais	4
2.1	Termos e definições luminotécnicos	4
2.1.1	Sistema de Coordenadas (C, γ).....	4
2.1.2	Fluxo luminoso (ϕ)	5
2.1.3	Iluminância no plano horizontal (E ou E_h)	6
2.1.4	Luminância (L).....	7
2.1.5	Uniformidade Global (<i>Overall Uniformity</i> , U_0).....	8
2.1.6	Uniformidade Longitudinal (<i>Longitudinal Uniformity</i> , U_L)	8
2.1.7	Encadeamento Perturbador (<i>Threshold Increment – TI</i>).....	8
2.1.8	Iluminação Envolvente (<i>Surround Ratio – SR</i>)	10
2.1.9	Índice de Reprodução de Cor (IRC) (<i>Color rendering index, CRI</i>).....	10
2.1.10	Temperatura de Cor (TC) (<i>Correlated Color Temperature, CCT</i>).....	10
2.1.11	Distribuição de potência espectral de uma fonte de luz	11
2.2	Desempenho visual dos condutores.....	12
2.3	Normas Europeias, Recomendações e Documentos Referência de iluminação pública.....	15
2.3.1	Norma Europeia EN13201	15
2.3.2	Documento de Referência para a Eficiência Energética na Iluminação Pública (DRREIP).....	21
2.3.3	Recomendações do relatório técnico CIE 115:2010 – <i>Lighting of roads for motor and pedestrian traffic</i>	23
3.	Tecnologia de iluminação: Tipo de fonte de luz e equipamentos constituintes.....	25
3.1	Alta intensidade de descarga (AID) (<i>High Intensity Discharge, HID</i>).....	25
3.1.1	Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão, VSAP (<i>High Pressure Sodium</i>)	27
3.1.2	Lâmpada de Iodetos Metálicos, IM (<i>Metal Halide</i>).....	28
3.2	<i>Lighting Emitting Diodes, LED</i>	29

3.3	Sistemas de regulação do fluxo luminoso.....	33
3.4	Luminárias	34
4.	Caracterização da Rede Nacional de Auto-estradas (RNA), da Auto-estrada A6 e do nó de Évora Poente.....	37
4.1	Descrição do caso de estudo	44
5.	Metodologia aplicada ao caso de estudo: Sistema de iluminação do Nó de Évora Poente	48
5.1	Aplicação da norma EN13201 <i>Road lighting</i>	49
5.1.1	Determinação da classe de iluminação segundo a norma EN 13201-1 e EN13201-2 ...	49
5.2	Análise das quantidades fotométricas medidas <i>in situ</i>	51
5.3	Análise da eficácia do sistema de iluminação	52
6.	Resultados.....	54
6.1	Desempenho do sistema de Iluminação Atual	54
6.2	Desenvolvimento do estudo de Remodelação (<i>Retrofit</i>) do sistema de iluminação existente	64
7.	Conclusões.....	79
8.	Bibliografia.....	82
9.	Anexos.....	86
	Anexo I – Funções de Eficiência Luminosa Fotópica, $V(\lambda)$, e Eficiência Luminosa Escotópica, $V'(\lambda)$	86
	Anexo II – Relatório da medição no dia 6/11/2012 segundo o formato do relatório teste do Anexo A da norma EN13201-4	89
	Anexo III – Curvas de distribuição da intensidade luminosa (cd) da luminária HADASA M250A/H e Philips SGS253 GB	91
	Anexo IV – Distribuição da iluminância medida na área relevante analisada do Local A para a Luminária VSAP_a.....	92
	Anexo V – Distribuição da iluminância calculado na área relevante analisada do Local A para a Luminária VSAP_b*.....	92
	Anexo VI – Distribuição da iluminância medida na área relevante analisada do Local B para a Luminária VSAP_a.....	92
	Anexo VII – Distribuição da iluminância calculada na área relevante analisada do Local B para a Luminária VSAP_b*.....	92

Anexo VIII – Síntese dos parâmetros necessários para avaliação dos custos do sistema de iluminação através do método de análise do custo do ciclo de vida da recomendação CIE115:2010.	93
Anexo IX – Balastro eletrônico ECOLUM	94
Anexo X – Princípio de funcionamento do temporizador programado do balastro eletrônico	95
Anexo XI – Curvas de distribuição da intensidade luminosa (cd) da luminária LED_a e LED_b....	96
Anexo XII – Driver <i>Integrated Dynadimmer Philips</i> para luminárias LED	97

Índice de Figuras

Figura 1 – Despesas de funcionamento das concessionárias de auto-estradas e do InIR, I.P.	1
Figura 2 – Orientação do sistema de coordenadas C, γ em relação à direção longitudinal da faixa de rodagem [7].	4
Figura 3 – Disposição geométrica para a lei do cosseno quadrado inverso [8]. $I(C, \gamma)$ – Intensidade luminosa (cd); C – é o azimuth fotométrico ($^{\circ}$); γ – o ângulo fotométrico vertical ($^{\circ}$); ω – ângulo sólido (Sr); D – Distância entre a fonte e o ponto P; PN – N normal ao ponto P na superfície da estrada; ε – Ângulo entre a normal (N) à superfície e a direção da distância D.	5
Figura 4 – Relações angulares para uma luminária na superfície da estrada [7]. H – altura do suporte da luminária, metros; PN – N normal ao ponto P na superfície da estrada; β – Ângulo suplementar, em graus; ε – Ângulo de incidência, em graus; σ – Ângulo de observação, em graus; φ – Azimute de instalação, em graus.	6
Figura 5 – Esquema representativo da luminância (L) [9].	7
Figura 6 – Disposição das variáveis, utilizadas no cálculo do encadeamento perturbador, num espaço 2D.	9
Figura 7 – Função do encadeamento perturbador (f_{TI}) para um sistema de iluminação fictício, considerando três níveis diferentes de luminância [11].	9
Figura 8 – Identificação dos locais onde são medidas os valores de iluminância para o cálculo do fator de iluminação envolvente [9].	10
Figura 9 – Diagrama de cromaticidade CIE com <i>blackbody locus</i>	11
Figura 10 – Curvas de distribuição de potência espectral para diferentes fontes de luz [13]. O eixo do xx é potência relativa e o eixo do yy é comprimento de onda (nm).	11
Figura 11 – Estrutura do olho humano [16].	12
Figura 12 – a) Eficiência luminosa das funções Fotópica, $V(\lambda)$, Escotópica, $V'(\lambda)$, e Mesópica [20]; b) Sensibilidade espectral Fotópica e Escotópica normalizada, eficácia luminosa, no olho humano [8]: Tabela presente no Anexo I.	13
Figura 13 – Campo de cálculo/medição de luminância para a área relevante. 1 – Limite da área relevante; 2 – Campo de cálculo; 3 – Largura da área relevante; 4 – Última luminária do campo de cálculo; 5 – Primeira luminária do campo de cálculo; 6 – Observador; 7 – Direção de observação.	18
Figura 14 – Exemplos da configuração do campo de cálculo/medição para várias configurações do sistema de iluminação.	19
Figura 15 – Posição dos pontos de cálculo/medição numa faixa de rodagem. 1 – Limite da faixa de rodagem; 2 – Última luminária no campo de cálculo; 3 – Campo de cálculo; 4 – Linha central da faixa de rodagem; 5 – Primeira luminária no campo de cálculo; 6 – Direção de observação; 7 – Posição longitudinal do observador; X – Linhas de pontos de cálculo nas direções transversal e longitudinal.	19

Figura 16 – Configuração, para cálculo de valores de iluminância, dos pontos de cálculo/medição na área relevante definida. 1 – Luminária; 2 - Largura da área relevante; 3 – Campo de cálculo; X – Linhas de pontos de cálculo nas direções transversal e longitudinal.	20
Figura 17 – Exemplo das áreas referidas no cálculo do parâmetro S da Equação (19) [9].	22
Figura 18 – As várias classes energéticas e respetivos intervalos de eficiência energética (lm/W) [9].	22
Figura 19 – Esquema dos três tipos de lâmpada de alta intensidade de descarga: a) Vapor de Mercúrio; b) Iodetos Metálicos; c) Vapor de Sódio de Alta Pressão [26].	26
Figura 20 – Comportamento eléctrico típico, nas diferentes fases de operação, de uma lâmpada AID [27]. O eixo de coordenadas ‘xx’ é tempo (t) e o eixo de coordenadas ‘yy’ é tensão (V) e corrente (I). (Adaptado para Português).	27
Figura 21 – Exemplo de uma lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão [26].	27
Figura 22 – Distribuição do espectro de potência típica de uma lâmpada de Vapor de Sódio Alta Pressão (<i>High Pressure Sodium</i>) [18].	28
Figura 23 – Distribuição do espectro de potência típica de uma lâmpada <i>Ceramic Metal Halide</i> [18].	29
Figura 24 – Evolução dos valores de eficácia e preço para os sistemas LED [32].	30
Figura 25 – Distribuição do espectro de potência (<i>Spectral Power Distribution</i>) típica de uma lâmpada <i>White LED</i> [18].	31
Figura 26 – Componentes da luminária LED (tecnologia SSL) e considerações de fiabilidade [33].	31
Figura 27 – Distribuição das falhas durante um período de operação de 34 000h para uma família de luminárias instaladas no exterior [33].	32
Figura 28 – Curvas típicas de manutenção da luminosidade para a tecnologia alta intensidade de descarga, e curvas estimadas para LED [31].	32
Figura 29 – a) Exemplo de um balastro electrónico [34]; b) Diagrama esquemático do sistema remoto de monitorização da empresa Telensa [35].	34
Figura 30 – Diferentes tipos de distribuição laterais da intensidade luminosa para luminárias no centro ou próximas do centro da área: a) Tipo I; b) Tipo I 4-vias e c) Tipo V [8].	35
Figura 31 – Diferentes tipos de distribuição laterais da intensidade luminosa para luminárias próximas da lateral da área: a) Tipo II; b) Tipo II 4-vias; c) Tipo III e d) Tipo IV [8].	35
Figura 32 – Exemplo de uma luminária <i>Full Cutoff</i> [36].	35
Figura 33 – Exemplo de uma luminária <i>Cutoff</i> [36].	36
Figura 34 – Exemplo de uma luminária <i>Semi-Cutoff</i> [36].	36
Figura 35 – Exemplo de uma luminária <i>Non-Cutoff</i> [36].	36
Figura 36 – a) Evolução da rede nacional de auto-estradas (RNA) entre 1990-2010 [37]; b) Evolução do Tráfego Médio Diário Anual (TMDA) e extensão das auto-estradas (AE) [37].	37
Figura 37 – a) Intensidades de tráfego (TMDA – Tráfego médio diário anual) na rede nacional de auto-estradas (RNA) em Portugal no ano de 2010 [37]; b) Distribuição da RNA por classes de TMDA [38].	38

Figura 38 – Mapa do distrito de Évora [39].	38
Figura 39 – a) Auto-estradas presentes na rede Transeuropeia de Transportes (RTE-T) em 2010; b) Rede Nacional de Auto-Estradas GETI [37].	40
Figura 40 – Evolução do Tráfego médio diário mensal (TMDM) na auto-estrada A6 entre o período de 2008 – 2011 (Dados fornecidos pelo InIR, I.P).	40
Figura 41 – Consumo eléctrico médio mensal dos Nós da auto-estrada A6 em 2011 (Dados disponibilizados pela BRISA).	41
Figura 42 – a) Mapa de Portugal com respetiva rede nacional de auto-estradas (RNA). A linha azul corresponde à auto-estrada A6 e o ponto preto ao nó de Évora Poente em estudo; b) Imagem satélite do nó de Évora Poente da auto-estrada A6. Fonte: <i>GoogleEarth®</i>	42
Figura 43 – a) Número total de veículos horário, a entrar e a sair da Portagem de Évora Poente, durante o mês de Abril de 2011. b) Número total de veículos diário a entrar e a sair da Portagem de Évora Poente, durante o mês de Abril de 2011. (Dados disponibilizados pela BRISA)	43
Figura 44 – Comparação entre os tráfegos médios diários mensais dos sublaços Montemor Oeste – Évora Poente e Évora Poente – Évora Nascente, em 2008 e 2011 (Dados fornecidos pelo InIR, I.P).	43
Figura 45 – Distribuição das luminárias geograficamente no Nó de Évora Poente. As luminárias estão representadas por tipo/potência (esfera - 250W, círculo - 150W e quadrado - projetor 250W) e pelo estado de funcionamento (amarelo-ligado, cinzento-desligado). Fonte: Concessionária BRISA	44
Figura 46 – Fotografias dos Locais A e B em estudo tiradas durante as medições na noite de 6/11/2012	45
Figura 47 – Variação anual do consumo total mensal de energia ativa, reativa (indutiva e capacitiva) no nó de Évora Poente em 2011	47
Figura 48 – Resumo da metodologia e métodos adotados para o estudo da implementação de um sistema de iluminação eficiente.	49
Figura 49 – Área relevante do troço de auto-estrada do nó de Évora Poente: a) Local A e b) Local B	51
Figura 50 – Distribuição dos pontos de iluminância (circunferências) medidos na malha (a azul) descrita na superfície da estrada da: a) Local A; b) Local B	52
Figura 51 – Consumo de corrente (A) e tensão (V) no período de transição, no dia 6 de Novembro de 2012.	54
Figura 52 – Potência ativa e reativa total do sistema eléctrico do Nó de Évora Poente, no dia 6 de Novembro.	55
Figura 53 – Fator de potência do sistema eléctrico do Nó de Évora Poente, no dia 6 de Novembro.	55
Figura 54 – Espectro de distribuição de potência da lâmpada (<i>Spectral power distribution</i>) <i>Master Son-T PIA 250W</i> (W/nm). Dados disponibilizados pela Philips ®.	57
Figura 55 – Função de lumens fotópicos e escotópicos por nm incorporados pelo olho Humano. (Espectro de distribuição de potência da lâmpada <i>Master Son-T PIA 250W</i> (W/nm) (Figura 54) foi multiplicado pelo espectro de sensibilidade fotópica e escotópica (lm/W)(Figura 12b)).	58

Figura 56 – a) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) medida no troço de auto-estrada, Local A, com luminária de 250W VSAP_a instalada aos 0m e 45m; b) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local A, com luminária de 250W VSAP_b* instalada aos 0m e 45m; c) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) medida no troço de auto-estrada, Local B, com luminária de 250W VSAP_a instalada aos 0m e 90m; d) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local B, com luminária de 250W VSAP_b* instalada aos 0m e 90m	59
Figura 57 – Variação da luminância, uniformidade global e uniformidade longitudinal com altura do poste onde está instalada a armadura a) VSAP_b* e b) VSAP_b. O local considerado é o Local A. ...	64
Figura 58 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Inverno após a implementação do balastro eletrónico.	68
Figura 59 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Verão após a implementação do balastro eletrónico.	68
Figura 60 – a) Valor de iluminância e luminância nos Locais A e B com a tecnologia VSAP_b*, considerando a potência nominal das luminárias, 100% e redução para 60%. b) Valor de iluminância e luminância nos Locais A e B com a tecnologia VSAP_b e colunas de iluminação de 11m, considerando a potência nominal das luminárias, 100% e redução para 60%. Os quadrados correspondem a valores de iluminância e os círculos a valores de luminância. A cor vermelha corresponde ao Local A e a azul ao Local B.	69
Figura 61 – Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local A: a) LED_a e b) LED_b. Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local B: c) LED_a e d) LED_b	71
Figura 62 – Variação da luminância, uniformidade global e uniformidade longitudinal com altura do poste onde está instalada a armadura LED_a e LED_b. O local considerado é o Local A.	73
Figura 63 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Inverno após a implementação de luminárias LED com driver regulador de fluxo.	74
Figura 64 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Verão após a implementação de luminárias LED com driver regulador de fluxo.	74
Figura 65 – Valores de iluminância e luminância nos Locais A e B com as tecnologias, a) LED_a, b) LED_b, instaladas considerando a potência nominal das luminárias, 100%, redução para 70%, 50% e 10% na tecnologia LED. A altura da coluna de iluminação de ambas as luminárias é de 10m. Os quadrados indicam os valores de iluminância, os círculos indicam valores de luminância, a cor vermelha indica o Local A e a azul o Local B.	75

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Agrupamento de situações de iluminação [23]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1).....	16
Tabela 2 – Intervalo recomendado de classes de iluminação [23]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1).....	17
Tabela 3 – Seleção do ícone para o intervalo recomendado [23]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1).....	17
Tabela 4 – Requisitos fotométricos das classes de iluminação ME [10]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1).....	18
Tabela 5 – Valores típicos das características luminotécnicas para a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.....	28
Tabela 6 – Valores típicos das características luminotécnicas para a lâmpada de Iodetos Metálicos. ..	29
Tabela 7 – Comparação de valores fotométricos entre luminárias exteriores [31].	30
Tabela 8 – Sublancos da auto-estrada A6 e respetiva extensão de estrada [37].	39
Tabela 9 – Sistema de classificação da estrada com pavimento em diferentes tipos de asfalto (R1, R2, R3, R4).....	42
Tabela 10 – Descrição das 2 áreas onde foram efetuadas medições.	44
Tabela 11 – Informação sobre o sistema de iluminação, lâmpada e luminária, presente no Nó de Évora Poente.....	46
Tabela 12 – Situação de iluminação para a área relevante de auto-estrada do nó de Évora Poente	49
Tabela 13 – Intervalo recomendado de classes de iluminação para o troço de auto-estrada Nó Évora Poente.....	50
Tabela 14 – Seleção recomendada do ícone segundo características da área relevante.....	50
Tabela 15 – Valores fotométricos requerido pela classe de iluminação ME.....	50
Tabela 16 – Características das luminárias utilizadas no estudo luminotécnico dos Locais A e B do Nó de Évora Poente auto-estrada. Dados provenientes do fabricante	57
Tabela 17 – Características luminotécnicas importantes das lâmpadas <i>MASTER SON-T PIA Plus: Philips</i> , <i>VSAP_b</i> e <i>MASTER SON-T PIA Hg-Free: Philips</i> , <i>VSAP_a</i>	58
Tabela 18 – Iluminância medida <i>versus</i> calculada para os Locais A e B do Nó auto-estrada Évora Poente, considerando as luminárias <i>VSAP_a</i> , <i>VSAP_b</i> e <i>VSAP_b*</i>	60
Tabela 19 – Caracterização fotométrica do Local A e B através do DIALux proporcionada pela luminária <i>VSAP_b*</i> . Comparação com os valores requeridos pela norma EN13201.	61
Tabela 20 – Aplicação do método do custo do ciclo de vida, sugerido pela recomendação CIE115:2010, ao sistema de iluminação do nó de auto-estrada de Évora Poente.	63
Tabela 21 – Método de seleção da classe de iluminação de uma estrada, sugerida pela recomendação CIE115:2010.	66
Tabela 22 – Dados técnicos do balastro eletrónico ECOLUM EC4 [34].....	67

Tabela 23 – Cálculo da poupança obtida com a implementação de balastros eletrónicos.	70
Tabela 24 – Características das luminárias utilizadas para remodelação do sistema de iluminação presente no Nó de Évora Poente auto-estrada. [46] O estudo luminotécnico incidiu nos Locais A e B.	71
Tabela 25 – Caracterização fotométrica do Local A e B através do DIALux proporcionada pelas luminárias LED_a e LED_b. Comparação com os valores requeridos pela classe de iluminação ME3a.	72
Tabela 26 – Cálculo da poupança obtida com a implementação de luminárias LED com regulação de fluxo luminoso.....	76
Tabela 27 – Cálculo da poupança obtida com a implementação de luminárias LED com regulação de fluxo luminoso limitado a 50% de redução da potência luminosa.....	77
Tabela 28 – <i>Payback</i> simples para as medidas de eficiência energética estudadas.	77

Lista de acrónimos

ENE20 – Estratégia Nacional de Energia 2020

ADENE – Agência para a Energia

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

PPEC – Promoção da Eficiência no consumo de energia elétrica

InIR, I.P – Instituto de Infra-Estruturas rodoviárias, Instituto Público

SCUTs – Auto-estradas sem custo para os utilizadores

TMDM – Tráfego médio diário mensal

O&M – Operação e Manutenção

LED – *Light Emitting Diode*

OLED – Díodos orgânicos emissores de luz

LEP – Polímeros emissores de luz

IND – Indução

IM – Iodetos Metálicos

AID – Alta Intensidade de Descarga

VSAP – Vapor de Sódio de Alta Pressão

VSBP – Vapor de Sódio de Baixa Pressão

VM – Vapor de Mercúrio

FEE – Fundo Eficiência Energética

QREN – Quadro de referência Estratégica Nacional

PNAEE – Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

DRREIP – Documento referência para a eficiência energética na iluminação pública

CIE – International Commission on Illumination

EN – European Standards

IRC – Índice de Reprodução de Cor

TC – Temperatura de Cor

DPE – Distribuição de Potência Espectral

MOVE – *Mesopic Optimisation of Visual Efficiency*

RNA – Rede Nacional de Auto-Estradas

CEN – *European Committee for Standardization*

IESNA – *Illuminating Engineering Society of North America*

Fm – Fator de manutenção global

FMLL – Fator de manutenção da luminosidade da lâmpada/fonte de luz

FSL – Fator de sobrevivência da lâmpada/fonte de luz

FML – Fator de manutenção da luminária

DOE – *U.S Department of Energy*

Nomenclatura

Capítulo 2.1

I	Intensidade luminosa (cd)
C	Azimuth fotométrico ($^{\circ}$)
γ	Ângulo fotométrico vertical ($^{\circ}$)
ϕ	Fluxo luminoso (lm)
λ	Comprimento de onda (nm)
$V(\lambda)$	Função de sensibilidade espectral Fotópica
$V'(\lambda)$	Função de sensibilidade espectral Escotópica
ω	Ângulo sólido (Sr)
ε	Ângulo de incidência da luz ($^{\circ}$)
E	Iluminância (lux)
E_h	Iluminância horizontal (lux)
H	Altura do poste da luminária (m)
MF	Produto do fator de manutenção do fluxo luminoso da lâmpada e o fator de manutenção da luminária
β	Ângulo suplementar ($^{\circ}$)
σ	Ângulo de observação ($^{\circ}$)
φ	Azimuth de instalação ($^{\circ}$)
L	Luminância (cd/m^2)
r	Coeficiente de luminância reduzida para um vetor de luz incidente
U_0	Uniformidade global
U_L	Uniformidade longitudinal
TI	Encadeamento perturbador (%)
L_v	Luminância encandeante equivalente (cd/m^2)
SR	Iluminação envolvente

Capítulo 2.2

F	Lúmens fotópicos (lm)
F'	Lúmens escotópicos (lm)
P_λ	Potência espectral da fonte no comprimento de onda λ (W)
V_λ	Valor da eficiência luminosa da função fotópica no comprimento de onda λ
V'_λ	Valor da eficiência luminosa da função escotópica no comprimento de onda λ

Capítulo 2.3

ε	Eficiência energética da instalação (lm/W)
S	Área total resultante do produto do valor da interdistância entre pontos de luz e largura total da via e passeios, no caso do perímetro urbano, de fachada a fachada (m ²).
P	Potência total das luminárias mais auxiliares intervenientes na área calculada (W)
k	Fator de correção. Tem o valor 1 se L (componente transversal da área calculada) for superior a 6 metros; Tem o valor 1,33 se L < 1,33 metros
C_{in}	Custos da instalação (€/m)
m	Número de colunas presentes no campo de cálculo
C_{co}	Custo da coluna e fundação por unidade (€/unid)
n	Número de luminárias presentes no campo de cálculo
C_{lu}	Custo da luminária e a primeira lâmpada (€)
C_{ps}	Custo da rede elétrica desde do quadro (incluindo cabos, mão-de-obra, valas, etc.) (€/m)
C_{op}	Custo de operação no primeiro ano, por metro de estrada (€/m)
t_1	Tempo anual de funcionamento da iluminação (h)
t_2	Tempo de vida da lâmpada (a)
P_{lu}	Potência da luminária (kW)
C_{en}	Custo da energia (€/kWh)
C_{gr}	Custo da substituição conjunta das lâmpadas por unidade (€/unid)
C_{ir}	Custo da substituição individual da lâmpada por unidade (€/unid)
q	Número estimado de substituição individual de lâmpadas por ano (1-Fator de Manutenção, Fm)
C_{fi}	Custos fixos por coluna (€)
C_{aa}	Custo do ciclo de vida do sistema de iluminação (€/m)
C_{in}	Custos da instalação (por metro de estrada) (€/m)
CRF	Fator de recuperação de capital (<i>Capital recovery factor</i>)
Gf	Fator de crescimento
t	Número de anos de serviço do sistema de iluminação (anos)
i	Taxa de juro aplicada (%/100)
C_{op}	Custo de operação no primeiro ano por metro de estrada (€/m)

V_{ADT}	Volume de tráfego médio diário (veículos/dia)
R_{bc}	Razão benefício – custo (<i>benefit-cost ratio</i>)
C_{aa}	Custo do ciclo de vida do sistema de iluminação (€/m)
b	Taxa de crescimento do tráfego
N_c	Número de colunas por km
C_{cc}	Custos da colisão numa coluna (€)
r_1	Crescimento anual nos custos de colisões nas colunas (%)
p	Proporção do tráfego noturno
d	Redução dos acidentes noturnos devido à iluminação rodoviária
g	Taxa de acidentes na secção de estrada (acidentes/(10 ⁸ veículo km)
C_{pa}	Custos de acidentes (€)
r_2	Crescimento anual nos custos dos acidentes (%)
S_{tc}	Poupança nos custos de tempo por veículo.km

1. Introdução

Atualmente o tema da eficiência energética tem sido focado em todos os sectores que apresentam consumos energéticos significativos: indústria, habitação e serviços públicos. Em Portugal, o consumo de energia elétrica por tipo de consumo aumentou desde 1994, atingindo um máximo total de 50 613TWh em 2010, tendo-se seguido uma diminuição de 2,9% em 2011 [1] no contexto conhecido da crise. Para esta diminuição pode também ter contribuído a aplicação pelo Governo, em 2010, da Estratégia Nacional de Energia 2020 (ENE20) que segundo a Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, constitui uma agenda de competitividade para os mercados energéticos e para a economia portuguesa. O sector da indústria apresenta a maior percentagem de consumo elétrico em 2011, cerca de 36%, contrastando com os 3,4% de consumo eléctrico proveniente da iluminação pública [1]. Segundo a ADENE – Agência para a Energia, os custos energéticos da iluminação pública constituem valores próximos dos 50% nas despesas dos Municípios com a energia.

Como medida de incentivo à prática da eficiência energética, a ERSE tem vindo a desenvolver o Plano de promoção da eficiência no consumo de energia elétrica (PPEC). A título de exemplo, o PPEC 2011-2012 permitiu assegurar benefícios avaliados em cerca de 155 milhões de euros em medidas tangíveis com um custo de 18 milhões de euros. Estes benefícios correspondem a um valor das poupanças de energia elétrica acumuladas de 2 244GWh, superior ao consumo proveniente da iluminação pública em 25,4%, e que permanecerão até ao ano 2032 [2].

Um dos serviços públicos que pode beneficiar com estes incentivos é a iluminação dos “Nós” de auto-estrada, considerada no consumo proveniente da iluminação das vias públicas. Este sector tem sido amplamente afetado com a diminuição de receita, visto que, o sistema de iluminação de um nó de auto-estrada apresenta um consumo de eletricidade anual de aproximadamente 70% do consumo energético total do nó (Nó Évora Poente, A6) e a despesa total de funcionamento das concessionárias de auto-estradas e do InIR, I.P, aumentou cerca de 33% em 2011 relativamente ao período de 2009 [3], Figura 1, sendo expectável que continue a aumentar no futuro face ao aumento previsível do preço da eletricidade.

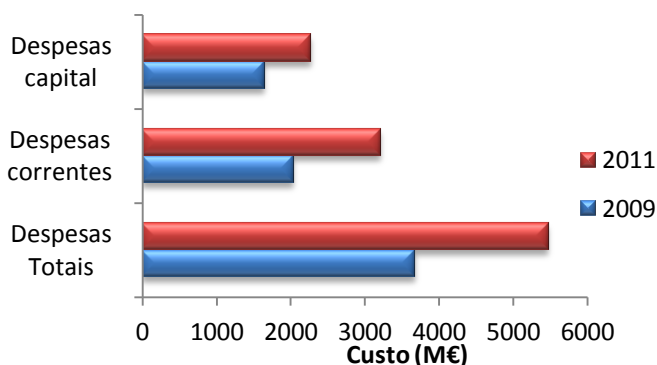


Figura 1 – Despesas de funcionamento das concessionárias de auto-estradas e do InIR, I.P.

Os cortes de receita das concessionárias de auto-estradas devem-se à diminuição do volume de tráfego médio diário mensal (TMDM), que pode chegar aos 20%, e que tem impacto negativo ao nível das receitas de portagens obtidas, que apenas chegam a cobrar 24% do total dos encargos incorridos (Estradas de Portugal, 1º semestre 2012 Ex-SCUTS). É de salientar que os custos de cobrança das portagens podem atingir cerca de 18% do total recebido. Esta diminuição do Tráfego Médio Diário Mensal (TMDM) deve-se ao aumento do regime de exploração com portagem ao utente (abolição do regime SCUT em 2011) e a um aumento no preço do combustível [1], o que origina uma diminuição proporcional na receita obtida das portagens [3, 4] e um aumento na despesa na área da Operação e Manutenção (O&M) [3, 4]. O aumento do preço da eletricidade e a conjuntura macroeconómica desfavorável apresentam também elevado peso no aumento da despesa das concessionárias.

A diminuição da qualidade do serviço de iluminação rodoviária nos nós de auto-estrada que se verificará se as concessionárias simplesmente desativarem luminárias com o objetivo de diminuir as despesas, prejudica claramente a segurança dos condutores, durante a tarefa de condução, aumentando a probabilidade de acidentes. Sendo a circulação na auto-estrada um serviço pago pelo condutor, este tem todo o direito às condições ótimas necessárias para salvaguardar a sua segurança. Entretanto, as concessionárias e municípios tentam encontrar soluções que promovam o dimensionamento de sistemas de iluminação energeticamente eficientes permitindo reduzir os custos correntes associados o que, na falta de estudos que as fundamentem, pode significar uma diminuição da qualidade do serviço prestado ao utente. Esta preocupação é notória a nível internacional, com sistemas já implementados e testados, por exemplo, na cidade de *San José, Califórnia*; na cidade de *Groton, Connecticut*; no município de *Saint-Gédéon-de-Beauce, Quebec, Canada*; cidade de *Rouyn-Noranda, Quebec, Canada*. No entanto, na Europa, os estudos realizados na área de iluminação exterior não são divulgados para consulta pública.

O projeto de *San José, Califórnia* [5] tinha como objetivo avaliar a implementação de tecnologias avançadas de iluminação de estrada, como luminárias LED, indução (IND) e vapor de sódio de alta pressão (VSAP), em seis áreas diferentes tendo como tecnologia de comparação, a luminária de vapor de sódio de baixa pressão (VSBP). A avaliação baseava-se no potencial de poupança energética e no desempenho na visão humana das luminárias com espectro amplo (*broad spectrum*), fornecido pelas fontes de luz LED e Indução, mantendo inalteráveis características como a qualidade da luz, manutenção, percepção de segurança dos condutores e pedestres e impacto ambiental. Um dos pontos importantes deste projeto foi a realização de uma avaliação subjetiva através da recolha de opiniões dos cidadãos sobre quais as luminárias mais adequadas para substituir as luminárias de baixo vapor de sódio já instaladas. Os resultados apresentam reduções de consumo de energia elétrica de 44% com a implementação de tecnologia LED, 64% quando a tecnologia LED tem associado um sistema de redução do fluxo luminoso e uma elevada preferência dos habitantes pelas tecnologias de iluminação de espectro amplo (fontes de luz branca – LED e IND). O estudo ainda indica que as luminárias que usam lâmpadas com espectro amplo apresentam melhorias na visibilidade dos condutores e pedestres e na precisão da reprodução das cores (*color rendering*) que se traduz pelo facto de que quando é reduzido o fluxo luminoso (*dimming control*) nas luminárias com fontes de espectro amplo os utentes não sentem necessidade da colocação de mais pontos de luz.

Todos os projetos apresentados têm em comum o uso de luminárias com elevada eficiência energética com os objetivos de [6]: *i*) melhorar a qualidade de vida das pessoas; *ii*) de uniformizar a iluminação de estradas e passeios; *iii*) reduzir o ofuscamento e melhorar a visibilidade; *iv*) aumentar a segurança e proteção dos utentes; *v*) aumentar as poupanças energéticas; *vi*) diminuir no investimento do sistema de iluminação, porque uma gestão eficiente do espaço a iluminar pode reduzir o número de luminárias necessárias; *vii*) diminuir os custos de manutenção; *viii*) criar uma atmosfera confortável à visão humana.

Com o aumento de apoios aos projetos de eficiência energética (FEE, QREN e PPEC), com o objetivo de reduzir a pegada de CO₂ e o consumo de eletricidade para atingir as metas estipuladas nas diretivas europeias (Estratégia 20-20-20 para 2020) e nacionais (Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020) e o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE)), o dimensionamento de sistemas de iluminação eficientes são uma solução com elevado benefício tanto para a concessionária como para os utentes.

Neste sentido, o objetivo deste estudo é analisar o atual sistema de iluminação com tecnologia vapor de sódio de alta pressão em funcionamento, e estudar o impacto das propostas de eficiência energética para remodelação desse sistema, que envolvem: *i*) substituição de balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos e *ii*) substituição das armaduras por módulos LED com função de redução do consumo energético (e o correspondente fluxo luminoso). Relativamente a ambas as opções pretende-se avaliar, a viabilidade do ponto de vista técnico face às normas existentes, as poupanças energéticas e o período de retorno financeiro.

1.1 Organização da dissertação

A dissertação divide-se em sete capítulos principais, sendo que o presente Capítulo faz uma abordagem geral ao enquadramento da iluminação pública rodoviária com a eficiência energética, com as condições financeiras das concessionárias e com a necessidade de segurança dos condutores.

No Capítulo 2 define-se os termos e definições luminotécnicos para facilitar a compreensão da norma EN13201 e recomendação CIE115:2010, aborda-se a questão do desempenho visual dos condutores perante o sistema de iluminação instalado e apresenta-se uma noção geral do conteúdo presente na norma EN13201, recomendação CIE115:2010 e documento referência DRREIP e de como se aplica.

No Capítulo 3 aborda-se a evolução da tecnologia de iluminação rodoviária, os elementos constituintes de uma luminária e os sistemas redutores de fluxo.

O Capítulo 4 faz uma caracterização da rede nacional de auto-estradas, em mais pormenor a auto-estrada A6 e o Nó de Évora Poente, e apresenta uma descrição do caso de estudo.

O Capítulo 5 descreve a metodologia aplicada ao caso de estudo, focando-se na norma EN13201, na recomendação CIE115:2010, na análise da eficácia do sistema de iluminação e da aplicabilidade do Documento Referência para a eficiência energética na iluminação pública (DRREIP).

No Capítulo 6 analisa-se o sistema de iluminação com tecnologia de vapor de sódio de alta pressão instalado no Nó de auto-estrada Évora Poente, numa ótica fotométrica, energética e financeira. São apresentados estudos de eficiência energética e o impacto da sua implementação na remodelação do sistema de iluminação instalado, numa ótica fotométrica, energética e financeira.

No Capítulo 7 são formuladas as principais conclusões e recomendações associadas ao estudo do sistema de iluminação eficiente.

2. Conceitos Gerais

2.1 Termos e definições luminotécnicos

2.1.1 Sistema de Coordenadas (C, γ)

Para determinar a distribuição da luz pelas luminárias usadas num sistema de iluminação são usados dados fotométricos para calcular as características da qualidade da iluminação, que vêm presentes nas *datasheets* das luminárias. Estes dados fotométricos apresentam-se na forma de uma tabela de intensidades (I -Tabela) que dá a distribuição da intensidade luminosa (cd)¹ emitida pela luminária nas direções relevantes. Os valores de intensidade (I) são dados em função do sistema de coordenadas usado para o sistema de iluminação rodoviário que é (C, γ), Figura 2, onde C é o azimuth fotométrico ($^\circ$), γ o ângulo fotométrico vertical ($^\circ$), 1 a luminária em inclinação durante as medições, 2 a direção Longitudinal, 3 o eixo fotométrico e 4 a direção da intensidade luminosa.

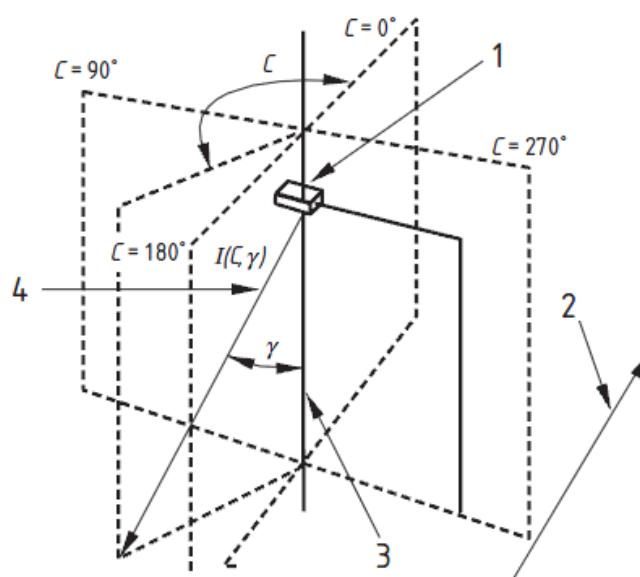


Figura 2 – Orientação do sistema de coordenadas C, γ em relação à direção longitudinal da faixa de rodagem [7].

Na *datasheet* de uma luminária, a tabela de intensidades luminosas, $I(C, \gamma)$, é apresentada em várias formas de gráficos como, por exemplo, o diagrama polar da intensidade em semi-planos C e a distribuição da intensidade em sistema cartesiano em que variam o ângulo fotométrico vertical (γ) para o plano vertical longitudinal ($C0$ - $C180$), transversal ($C90$ - $C270$) e principal ($C_{\text{máximo}}$). Estes gráficos são importantes para perceber qual a distribuição ótima da intensidade luminosa (cd) proporcionada pelas luminárias constituintes do sistema de iluminação para o tipo de aplicação pretendido.

¹ A definição atual da candela (cd) é a intensidade luminosa, numa determinada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz e que tem uma intensidade radiativa nessa direção de $1/683$ W/sr.

2.1.2 Fluxo luminoso (ϕ)

A quantidade de luz emitida em todas as direções por uma fonte de luz designa-se por fluxo luminoso e tem como unidade o lúmen (lm). Segundo a IESNA, o lúmen é, de facto, uma unidade que relaciona o fluxo radiante (em Watts) à radiação visualmente eficaz (isto é, luz) para um observador humano padrão. Isto porque a energia radiativa é propagada em forma de ondas eletromagnéticas que atuam sobre a retina, estimulando a resposta dos fotorreceptores, bastonetes e cones, que produzem uma sensação visual. A sensação visual é composta por uma função fotópica, $V(\lambda)$, que descreve a função de eficiência espectral luminosa para a visão fotópica (cones) e por uma função escotópica, $V'(\lambda)$, que descreve a função de eficiência espectral luminosa para a visão escotópica (bastonetes). No capítulo 2.2 será abordado em maior pormenor estes dois tipos de função e respetiva importância para a área da iluminação pública rodoviária.

O fluxo luminoso pode ser analisado direccionalmente em termos de ângulo sólido (ω). Considerando que a origem do sistema de coordenadas esféricas está localizada na fonte de luz, e a área (A) é muito pequena comparada com a distância (D) à fonte de luz, Figura 3, então [8]:

$$\omega = \frac{A}{D^2} \times \cos \varepsilon \quad (1)$$

Onde,

D – Distância entre a fonte e o ponto P,

ε – Ângulo entre a normal (N) à superfície e a direção da distância D

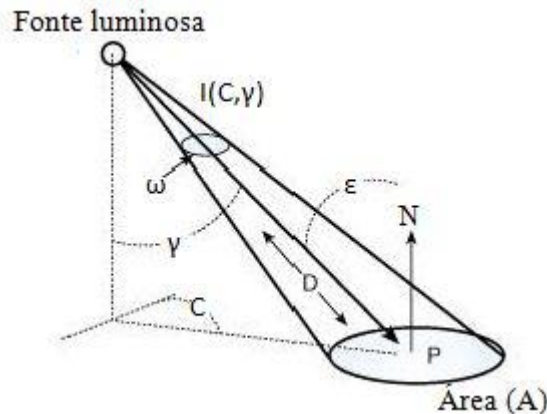


Figura 3 – Disposição geométrica para a lei do cosseno quadrado inverso [8]. $I(C, \gamma)$ – Intensidade luminosa (cd); C – é o azimuth fotométrico ($^\circ$); γ – o ângulo fotométrico vertical ($^\circ$); ω – ângulo sólido (Sr); D – Distância entre a fonte e o ponto P; PN – N normal ao ponto P na superfície da estrada; ε – Ângulo entre a normal (N) à superfície e a direção da distância D .

Assim, o fluxo luminoso emitido numa direção (ϕ) para uma dada intensidade luminosa (I) de uma fonte de luz (unidade é a candela (cd)), num ângulo sólido ω orientado segundo essa mesma direção, é dada por [8]:

$$\phi = I(C, \gamma) \times \omega \quad (2)$$

2.1.3 Iluminância no plano horizontal (E ou E_h)

A iluminância (E) define-se como o fluxo luminoso incidente (dφ) por unidade de área diferencial iluminada (dA), e tem como unidade o lux (lx).

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (3)$$

Suficientemente longe da fonte, e se a intensidade luminosa (I) for constante na vizinhança da direção (C, γ) a iluminância (E) pode ser descrita na forma da lei do cosseno quadrado inverso [8]:

$$E = \frac{I(C, \gamma) \times \cos^3 \varepsilon}{D^2} \quad (4)$$

O cálculo da iluminância horizontal (E_h), num ponto da estrada, segundo a norma EN13201-3 [7], abordada na Secção 2.3.1, pode ser feito a partir da relação:

$$E_h = \frac{I \times MF \times \cos^3 \varepsilon \times \phi}{H^2} \quad (5)$$

Onde,

E_h – é a iluminância horizontal num ponto, em lux

I – é a intensidade luminosa na direção do ponto, em cd/klm

ε – é o ângulo incidente da luz num ponto, em graus

H – é a altura do suporte da luminária, em metros

φ – é o fluxo luminoso inicial da lâmpada ou lâmpadas da luminária, em klm

MF – é o produto do fator de manutenção do fluxo luminoso da lâmpada e o fator de manutenção da luminária.

A Figura 4 é um diagrama esquemático que completa a Figura 3 e representa as relações angulares para uma luminária, com observador e ponto de observação presente na superfície estrada.

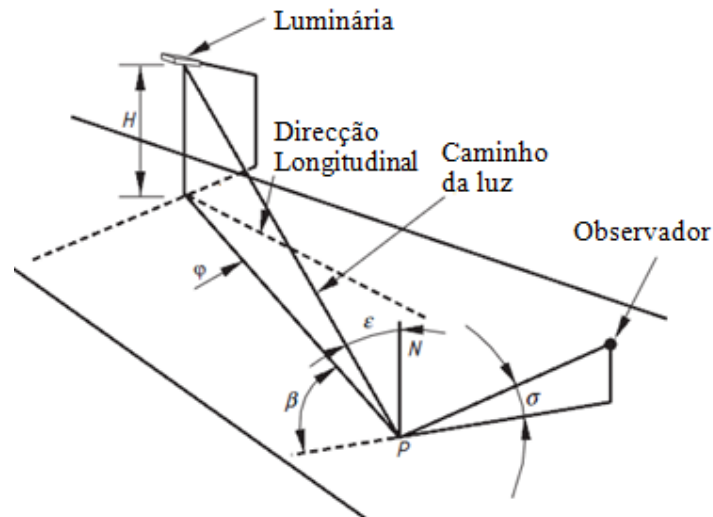


Figura 4 – Relações angulares para uma luminária na superfície da estrada [7]. H – altura do suporte da luminária, metros; PN – N normal ao ponto P na superfície da estrada; β – Ângulo suplementar, em graus; ε – Ângulo de incidência, em graus; σ – Ângulo de observação, em graus; φ – Azimute de instalação, em graus.

A iluminância média (E_{h,média}) numa área de estrada é a média aritmética de todos os pontos de iluminância calculados sobre essa superfície da via.

2.1.4 Luminância (L)

A luminância (L) de uma superfície é uma medida da intensidade da luz (I) proveniente dessa superfície por unidade de área (A) numa direção específica (θ), como mostra a Figura 5. Esta intensidade de luz pode, consoante a situação específica que estamos a estudar, ser dominada pela componente de luz refletida ou difundida pela superfície, mas também, pela que é emitida pela própria superfície se estivermos a tratar de corpos a elevadas temperaturas. Naturalmente, no contexto deste trabalho, há apenas interesse na primeira situação. Esta grandeza pode escrever-se através da Equação (6), e tem como unidade a candela por metro quadrado (cd/m^2) [9]. Para uma forma mais fácil de compreensão a luminância (L) mede a luz (brilho – *brightness*) proveniente da superfície como é percebida pelo olho humano, porque a visibilidade de todos os objetos e superfícies presentes no campo de visão do olho humano é devido à sua luminosidade². Em níveis baixos de iluminação utilizados para a iluminação de auto-estrada, o desempenho da tarefa de condução melhora com a luminância em termos de aumento da sensibilidade ao contraste, aumento da acuidade visual e melhoria de brilho [10].

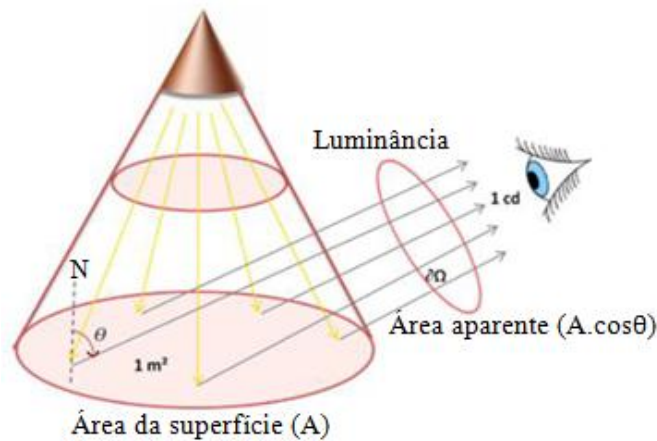


Figura 5 – Esquema representativo da luminância (L) [9].

$$L = \frac{I}{A \times \cos \theta} \quad (6)$$

O cálculo da luminância (L), num ponto de uma estrada iluminada com uma luminária, segundo a norma EN13201-3 [7], abordada na Secção 2.3.1, pode ser feito recorrendo à seguinte equação:

$$L = \frac{I \times r \times \phi \times MF \times 10^{-4}}{H^2} \quad (7)$$

Onde,

L – Luminância, candelas por m^2 (cd/m^2)

I – Intensidade luminosa na direção (C, γ), indicada nas Figura 2 e Figura 3, em cd/klm

r – Coeficiente de luminância reduzida para um vetor de luz incidente, com coordenadas angulares (ϵ, β) – obtido através da tabela de reflexão do pavimento, em estereorradiano (sr^{-1}).

ϕ – Fluxo luminoso inicial das fontes em cada luminária, em klm

MF – Produto do fator de manutenção do fluxo luminoso da lâmpada e o fator de manutenção da luminária.

H – Altura do suporte da luminária, em metros

² Superfícies com diferentes propriedades de refletância podem ter a mesma iluminância, mas diferente luminância. A luminância na superfície da estrada é o principal critério requerido pelas normas aplicadas à iluminação rodoviária. Um bom conhecimento das características de reflexão da luz dos pavimentos da estrada é de extrema importância para um dimensionamento do sistema de iluminação com maior precisão

2.1.5 Uniformidade Global (*Overall Uniformity*, U_0)

A Uniformidade Global (U_0) (8) é a razão entre o valor de luminância mínima e o valor de luminância média na faixa de rodagem. Mede de uma forma geral a variação de luminâncias e indica o grau de desempenho da superfície da estrada como fundo para marcas rodoviárias, objetos e condutores [10].

$$U_L = \frac{L_{min}}{L_{méd}} \quad (8)$$

2.1.6 Uniformidade Longitudinal (*Longitudinal Uniformity*, U_L)

A Uniformidade Longitudinal (U_L) (9) é a razão entre o valor de luminância mínima e o valor de luminância máxima longitudinal ao longo da via de trânsito. Se a faixa de rodagem tem mais que uma via de trânsito, então a uniformidade longitudinal é a menor das uniformidades longitudinais de entre as vias de trânsito da faixa de rodagem. A uniformidade longitudinal proporciona uma medida da evidência do padrão repetido de zonas claras e escuras na estrada. Relaciona-se com as condições visuais ao longo de troços ininterruptos de estrada [10].

$$U_L = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (9)$$

2.1.7 Encadeamento Perturbador (*Threshold Increment – TI*)

O Encadeamento Perturbador (TI) é uma medida que permite quantificar a perda de visibilidade causada pelo encandeamento das luminárias de iluminação pública [9]. A Figura 6 representa uma explicação em 2D da decomposição do fator TI nas suas variáveis constituintes. Esta medida indica que, embora a iluminação rodoviária melhore as condições visuais ela também provoca encandeamento em que a gravidade depende do tipo de luminária, lâmpada e situação geométrica [10]. O encandeamento perturbador vem em %.

$$TI = \frac{65}{(L_{med})^{0,8}} \times L_v \quad (10)$$

$$L_v = 10 \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\theta_k^2} = \frac{E_1}{\theta_1^2} + \frac{E_2}{\theta_2^2} + \dots + \frac{E_k}{\theta_k^2} + \dots + \frac{E_n}{\theta_n^2} \quad (11)$$

Onde [9],

L_{med} – Luminância média da estrada (cd/m^2)

L_v – Luminância encandeante equivalente (*veiling equivalent luminance*) (cd/m^2)³

E_k – Iluminância (lux, baseada no fluxo inicial da lâmpada em lumens) produzida pela luminária k, num plano normal à linha de visão e à altura do olho do observador.

θ_k – Ângulo, em graus, do arco entre a linha de visão e a linha desde o observador ao centro da luminária k.

³ Convencionalmente é admitido o valor 10, porque é aplicável a um observador com 23 anos de idade. No entanto, este valor varia de acordo com a idade do observador. A fórmula para calcular este valor encontra-se presente na recomendação CIE115:2010 com a referência C.3.

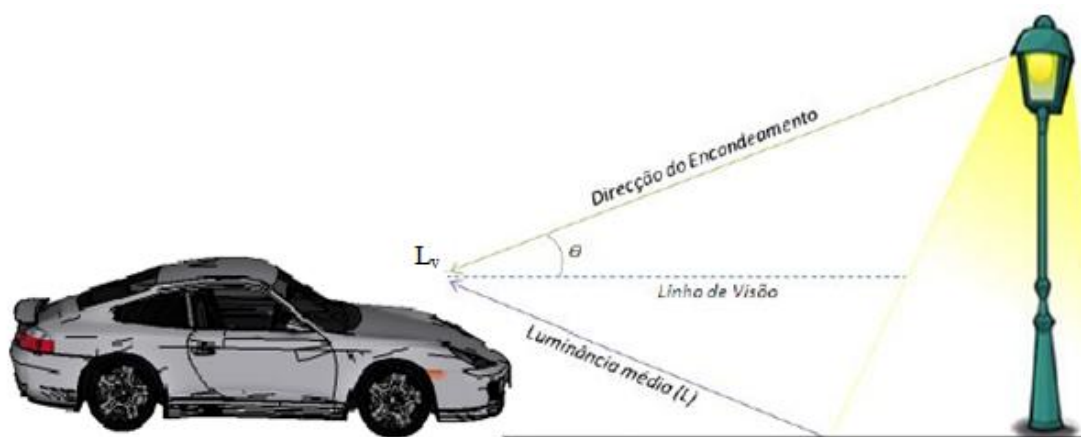


Figura 6 – Disposição das variáveis, utilizadas no cálculo do encadeamento perturbador, num espaço 2D.

De forma a evitar este encadeamento há que aumentar o nível de contraste para que o objeto seja visível nessas condições, ou seja, quanto maior for o valor de TI maior tem de ser o nível de contraste [9]. A Figura 7 mostra a variação das três curvas de adaptação da luminância do condutor. É possível perceber que quanto menor é a luminância, ou seja, a percepção da luz pelo olho humano maior é a percentagem de perda de visibilidade causada pelo encadeamento das luminárias. Esta perda de visibilidade é acentuada com o aumento da idade. É importante referir que segundo a norma EN13201-2, os valores de TI normalizados variam entre 10% e 15% com a diminuição das exigências na classificação da classe de iluminação da autoestrada, respetivamente.

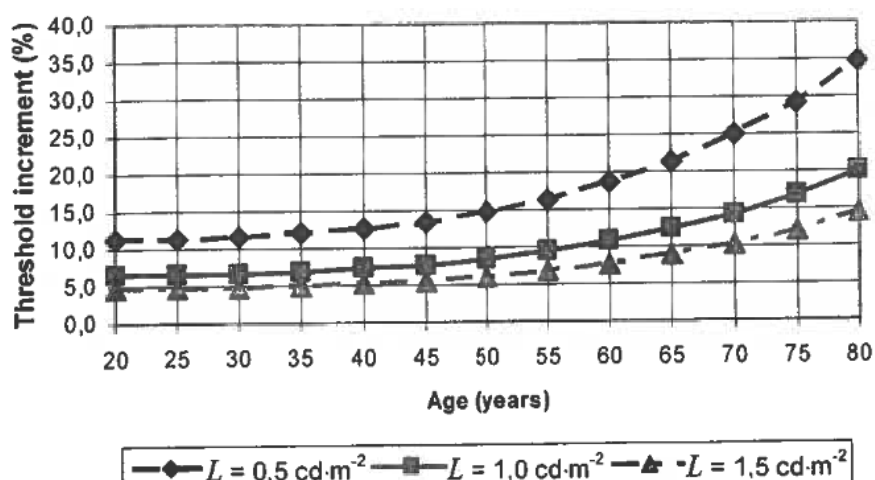


Figura 7 – Função do encadeamento perturbador (f_{π}) para um sistema de iluminação fictício, considerando três níveis diferentes de luminância [11].

2.1.8 Iluminação Envolvente (*Surround Ratio – SR*)

A Iluminação Envolvente (SR) é definida com sendo a razão entre a soma da iluminância média horizontal nas duas faixas longitudinais exteriores aos limites laterais de uma faixa de rodagem de viaturas e a soma da iluminância média horizontal de duas faixas longitudinais dessa estrada, adjacentes aos seus limites [9]. A Figura 8 mostra os locais onde são medidos os valores de iluminância.

$$SR = \frac{\bar{E}_1 + \bar{E}_4}{\bar{E}_2 + \bar{E}_3} \quad (12)$$



Figura 8 – Identificação dos locais onde são medidas os valores de iluminância para o cálculo do fator de iluminação envolvente [9].

2.1.9 Índice de Reprodução de Cor (IRC) (*Color rendering index, CRI*)

A cor pode ser percebida quando existe luz, objeto e um observador. A luz branca que ao olho humano parece incolor, na verdade contém todas as cores do espectro do visível, numa proporção característica da radiação solar recebida na superfície terrestre. O espectro do visível é uma pequena parte do espectro radiativo eletromagnético e situa-se na gama de comprimento entre os 400 (violeta) e os 700nm (vermelho).

Quando um objeto é iluminado por uma luz, este absorve um conjunto de comprimentos de onda e reflete outros. A luz refletida ou difundida é recebida pelas células fotorreceptores, cones e bastonetes, presentes na retina do olho do observador. A estimulação do desempenho visual por diversos tipos de luz é explicada em pormenor na Secção 2.2. Assim, o índice de reprodução de cor (IRC) representa a capacidade da fonte de luz para reproduzir cores de vários objetos, em comparação com a reprodução obtida por uma fonte de luz padrão (luz solar), tomada como referência [9]. Este índice é representado por uma escala de 0 a 100, em que quanto maior o valor maior a capacidade da lâmpada em reproduzir as cores dos objetos.

2.1.10 Temperatura de Cor (TC) (*Correlated Color Temperature, CCT*)

A temperatura de cor (TC) de uma fonte de luz é a temperatura de um corpo negro, em Kelvin (K), cuja radiação emitida tem a mesma cromaticidade que a fonte luminosa. O corpo negro irradia energia na banda do visível (vermelho, laranja, amarelo e branco azulado) quando a sua temperatura é aumentada. As cores da radiação do corpo negro quando desenhadas no diagrama de cromaticidade CIE formam uma linha curva conhecida como *blackbody locus* ou *Planckian locus*. A Figura 9 é conhecida como o diagrama de cromaticidade CIE 1931 ou CIE (x,y) [12].

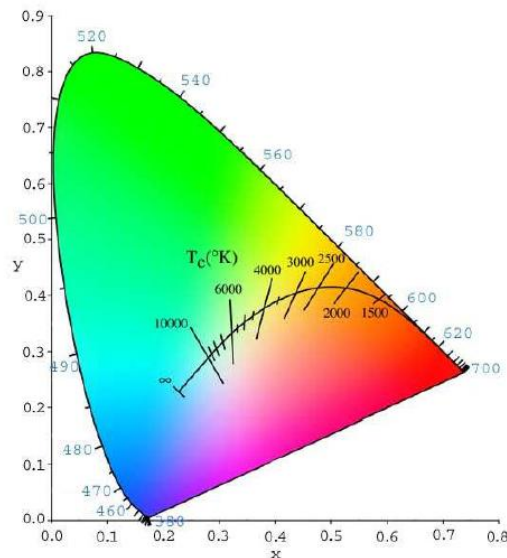


Figura 9 – Diagrama de cromaticidade CIE com *blackbody locus*.

A cromaticidade refere-se à aparência da cor de uma fonte de luz, sendo que a designação de “quente” é dada para valores baixos de TC (< 3000 K) [9] e “fria” para valores altos de TC (> 5000 K) [9].

2.1.11 Distribuição de potência espectral de uma fonte de luz

Todas as fontes de luz, quer sejam naturais ou artificiais, têm uma única curva de distribuição de potência espectral (DPE). A curva DPE mostra a potência radiativa que é emitida pela fonte de luz em função do comprimento de onda e a forma desta função determina a cor da luz. Normalmente os gráficos vêm em potência relativa (adimensional) ou potência espectral (W/nm). A Figura 10 mostra diferentes curvas de distribuição de potência espectral para diferentes tipos de fonte de luz: incandescente, luz solar, fluorescente de mercúrio, vapor de sódio de baixa e alta pressão e iodetos metálicos.

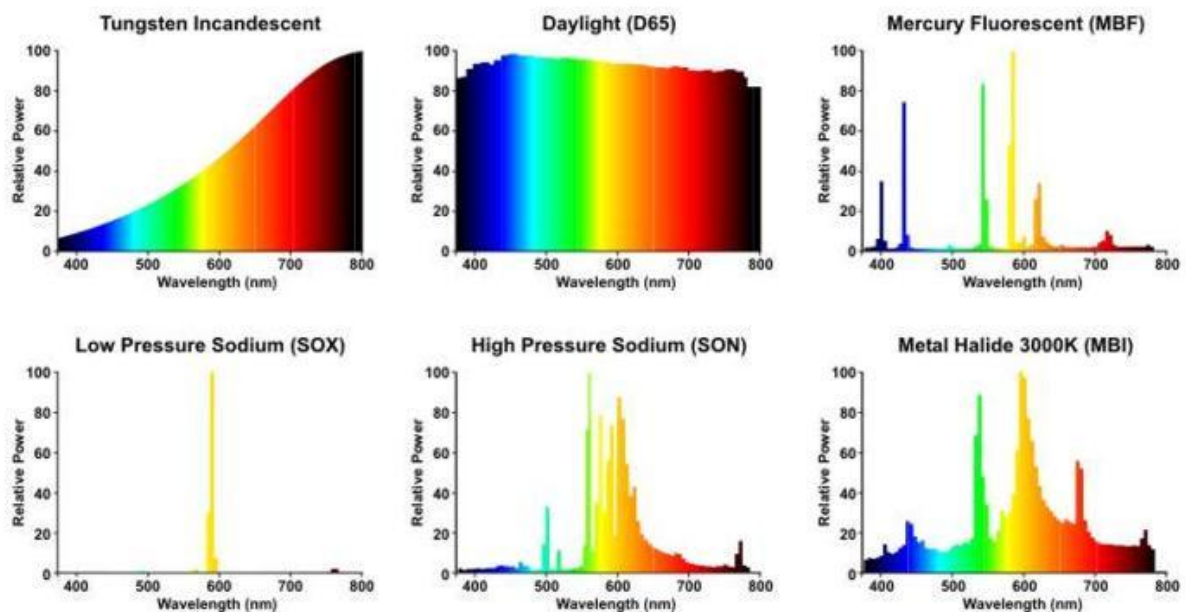


Figura 10 – Curvas de distribuição de potência espectral para diferentes fontes de luz [13]. O eixo do xx é potência relativa e o eixo do yy é comprimento de onda (nm).

2.2 Desempenho visual dos condutores

Para uma melhor compreensão da importância de um sistema de iluminação numa estrada é necessário primeiro perceber a interação existente entre a função de visão do ser humano e a luz. Um exemplo que permite compreender a relevância do estudo desta interação é o aumento da complexidade da visão humana quando o olho se adapta á diminuição dos níveis de iluminação ambiente. O olho humano contém dois tipos de fotorreceptores sensíveis, com extrema importância na perceção da luz, cada um com a sua sensibilidade espectral: *i*) os cones, que apresentam uma sensibilidade designada fotópica; *ii*) os bastonetes, que apresentam uma sensibilidade que se designa por escotópica [14].

A superfície da retina, localizada na superfície posterior do olho, Figura 11, é composta por cones (aproximadamente 7 milhões) e bastonetes (aprox. 120 milhões), responsáveis por receber os sinais óticos que são posteriormente convertidos em sinais elétricos e transferidos para o cérebro [15]. A fóvea, Figura 11, localizada na parte central da retina, é composta apenas por cones e é responsável pela precisão da visão central.

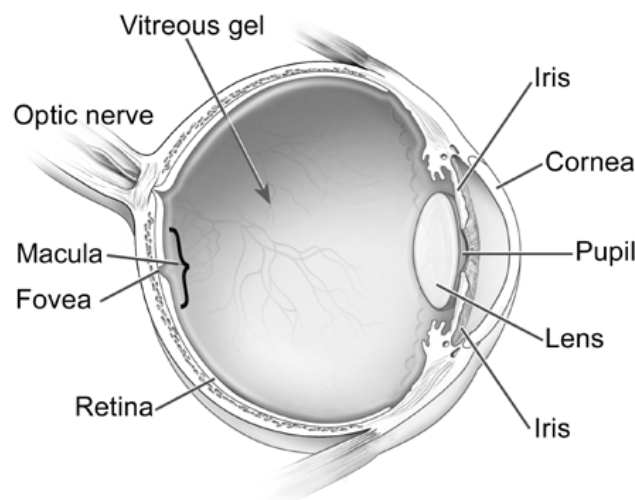


Figura 11 – Estrutura do olho humano [16].

Em condições diurnas, com elevados níveis de luminância ($> 3 \text{ cd/m}^2$), apenas os cones são ativados proporcionando ao olho humano uma visão fotópica [15, 17]. Uma visão nítida, detalhada e perceptível da cor é realizada através dos cones que estão preparados para responder à luz numa gama de comprimento de onda entre a luz azul (450nm) e a luz vermelha (675nm), com máximo na luz verde (555nm) [15, 17] como mostra a função de sensibilidade espectral Fotópica, $V(\lambda)$, com tracejado contínuo presente na Figura 12a). À noite, em espaços com níveis de luminância inferiores a $0,25 \text{ cd/m}^2$, apenas os bastonetes são ativados. Estes fotorreceptores são sensíveis à gama de comprimentos de onda entre a luz violeta (400nm) e a luz laranja (610nm) proporcionando ao olho humano uma visão escotópica [14, 15]. Como os cones não funcionam em níveis de luminância escotópica, não existe a perceção da cor. O comprimento de onda onde a função de sensibilidade espectral Escotópica, $V'(\lambda)$, é máxima é nos 507nm (luz verde-azul) [15, 17], como se representa na Figura 12a).

A visão humana no exterior, durante o período noturno e na presença de iluminação artificial envolve ambos os cones e bastonetes presentes na retina, e uma complexa mistura de tarefas dependentes das respostas fotópicas (cones) e escotópicas (bastonetes) [18]. Assim, para um nível de luminância intermédia ($0,01 \text{ candelas/m}^2$ até 3 candelas/m^2), ambos os cones e bastonetes conferem ao olho humano uma visão mesópica [15, 17]. O desempenho ótimo da visão mesópica tanto permite adquirir um visão periférica nítida como potencializar o reconhecimento de potenciais criminosos, leitura de placas para qualquer nível de iluminação noturna em que depende apenas da visibilidade central (*on-axis*), função desempenhada apenas pelos cones fotorreceptores.

A Figura 12b) mostra a eficácia luminosa⁴ do olho humano em relação às funções, fotópica $V(\lambda)$ e escotópica $V'(\lambda)$, para diferentes comprimentos de onda (cores) de luz, normalizada pela definição internacional de lúmen, i.e., 683 lumens/W aos 555nm para a função fotópica e 1700 lumens/W aos 507nm para a função escotópica [14]. Através do espectro de sensibilidade no olho humano e as distribuições de potência espectral de vários tipos de lâmpadas, Figura 10, é possível reduzir a luminância da superfície da estrada fornecendo a mesma ou melhor visibilidade se os valores normalizados forem obtidos a partir da função mesópica e não da função fotópica como atualmente se verifica [19].

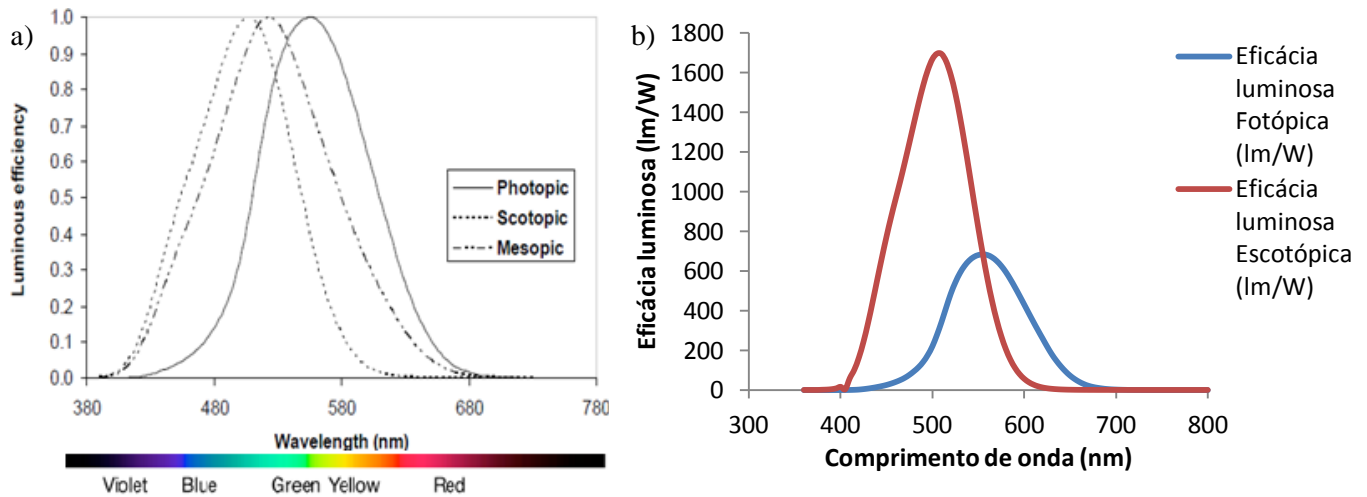


Figura 12 – a) Eficiência luminosa das funções Fotópica, $V(\lambda)$, Escotópica, $V'(\lambda)$, e Mesópica [20]; b) Sensibilidade espectral Fotópica e Escotópica normalizada⁵, eficácia luminosa, no olho humano [8]: Tabela presente no Anexo I – Funções de Eficiência Luminosa Fotópica, $V(\lambda)$, e Eficiência Luminosa Escotópica, $V'(\lambda)$.

Portanto, os lúmens fotópicos, F , e os lúmens escotópicos, F' , devem ser determinados pela distribuição de potência espectral da fonte de luz [8]:

$$F = 683 \sum_{360}^{800} P_{\lambda} V_{\lambda} \Delta \lambda \quad (13)$$

Onde,

P_{λ} – Potência espectral da fonte, em watts, no comprimento de onda λ

V_{λ} – Valor da eficiência luminosa da função fotópica no comprimento de onda λ

$\Delta \lambda$ – Intervalo de comprimento de onda onde os valores de potência espectral foram medidos

$$F' = 1700 \sum_{380}^{780} P_{\lambda} V'_{\lambda} \Delta \lambda \quad (14)$$

Onde,

V'_{λ} – Valor da eficiência luminosa da função escotópica no comprimento de onda λ

⁴ A eficácia luminosa de uma fonte de luz é definida como a razão entre o fluxo luminoso total (lúmens) e a potência total de entrada (em watts)

⁵ Os máximos são diferentes, dos dois espectros de sensibilidade, devido a consequências da normalização internacional aceite e fixada dos 683 lumens/W aos 555nm para a função fotópica e 1700 lumens/W aos 507nm para a função escotópica. Estes valores não estão relacionados com as diferenças inatas dos cones e bastonetes à sensibilidade da luz.

A eficácia luminosa máxima de uma fonte ideal branca (valores de temperatura de cor superiores a 5000K), definida como um radiador com uma emissão de lúmens constante ao longo da banda do visível do espectro e sem emissão nas outras bandas, é aproximadamente 220 lm/W.

No entanto, todos os estudos já realizados sobre valores estimados de luminância, de acordo com as funções mesópicas, ainda não são suficientes para a normalização de um sistema prático que determine os valores ótimos de luminância no período noturno com iluminação artificial. A complexidade da estimulação visual continua a suscitar muitas incertezas sobre quais os estímulos visuais mais importantes durante a tarefa de caminhada e condução, a forma da resposta espectral mesópica, visto que para diferentes medições do desempenho visual produzem-se diferentes curvas mesópicas, quais os métodos para avaliar o desempenho visual mais adequados e ponderar os estímulos foveal, parafoveal e periférico [18]. É necessário desenvolverem-se estudos que relacionem todos estes fatores com a adaptação da visão a vários níveis de luminância ao longo do tempo, construindo um sistema fotométrico unificado com precisão [18]. É necessário realçar que para um desempenho visual para baixos níveis de iluminação existem muitas outras respostas espectrais do que apenas a resposta escotópica, e que não existe uma única resposta mesópica [18].

Para resolver todas as incertezas criadas em redor da fotometria mesópica têm sido realizados vários trabalhos, como o projeto *Unified Photometry System* [21, 20] e os estudos desenvolvidos pelo consórcio de pesquisa Europeu, MOVE (*Mesopic Optimisation of Visual Efficiency*) [22], com o objetivo de compreender a estimulação visual humana para o nível de luminância mesópica.

A avaliação da estimulação visual humana para diferentes níveis de iluminação é assegurada por um sistema de fotometria unificado (*Unified Photometry System*) que determina os lumens unificados (*unified lumens*) produzidos por uma lâmpada [21, 20]. Para um correto dimensionamento de um sistema de iluminação aplicado a auto-estradas, estradas e ruas é essencial responder aos valores definidos na norma EN13201 que definem níveis de luz fotópica. Estas especificações são baseadas na determinação da quantidade mínima de lumens fotópicos ($lm_{fotópicos}$) requeridas para assegurar a segurança e proteção através do reconhecimento de objetos presentes no campo de visão frontal, como por exemplo uma pessoa atravessar a estrada [14], tornando o sistema de fotometria unificado uma ferramenta importante na determinação das exigências.

O MOVE foi construído para responder ao desafio de estabelecer uma base para o desempenho da iluminação baseada na fotometria mesópica. Este consórcio é composto por uma equipa multidisciplinar, liderada pelo Laboratório de Iluminação HUT da Finlândia [22]. O objetivo foi o de definir funções de sensibilidade espectral relevantes para o intervalo mesópico de 0,01 – 10 cd/m² e documentar os resultados como a base de uma norma internacional. Assim, providenciou-se uma base de dados científica para o desenvolvimento futuro de uma norma internacional sobre fotometria mesópica.

Na abordagem adotada pela MOVE, a atenção foi colocada sobre o desempenho visual durante a condução noturna e da tentativa de descrever a sensibilidade espectral mesópica (eficiência luminosa) de uma forma realista. Foi desenvolvido um método com várias técnicas em que o trabalho experimental foi dividido entre diversos locais de teste usando diferentes critérios visuais e configurações espectrais. O método usado pelo MOVE foi baseado na caracterização do desempenho visual durante a condução no período noturno através da identificação das tarefas visuais relevantes, divididas em três sub-tarefas, em que a 1ª Tarefa: deteção de um objeto visível, a 2ª Tarefa: rapidez de deteção e a 3ª Tarefa: identificação dos detalhes do objeto, que eram caracterizadas por questões, de forma a obter informações visuais: 1ª Tarefa: “*Can an object be seen?*” – 2ª Tarefa: *how quickly?* – 3ª Tarefa: *what is it?*” [22]. Os dados obtidos nas experiências visuais forneceram uma base de dados significativa sobre o desempenho visual mesópico permitindo estabelecer novas funções de eficiência luminosa mesópica.

A necessidade de aplicação dos sistemas referidos em cima é realçada com a capacidade do olho humano apresentar diferentes respostas para as diversas tarefas exigidas durante a condução (reforçado pelo consórcio MOVE). A função de visão do ser humano pode ser separada em pelo menos quatro tarefas distintas [14]:

- i) **Visão direta com detecção e reconhecimento de objetos (Visão Central)** – Esta tarefa é desempenhada apenas pelos cones presentes na fóvea, em condições de iluminação mesópica, fazendo com que a função de sensibilidade fotópica seja a única função espectral que contribui para a visão frontal e concentração na focagem de objetos.
- ii) **Percepção espacial da luminosidade (Visão Completa)** – Esta tarefa refere-se como a luz é percebida numa área espacial amplamente iluminada e é iniciada por ambos os fotorreceptores, cones e bastonetes, ao longo da retina e exigirá quantidades fotométricas escotópicas e fotópicas para descrever com precisão as percepções.
- iii) **Visão lateral com orientação e detecção de alvos localizados fora do eixo de visão** – Em condições de iluminação mesópica, ambos os cones e bastonetes contribuem para a orientação e detecção de objetos fora do eixo central de visão.
- iv) **Deteção de movimento** – A capacidade para detetar movimento tanto no espaço central como periférico é uma tarefa visual importante e útil para manter a segurança na condução noturna. Contudo, ambos os fotorreceptores, cones e bastonetes, em níveis de iluminação mesópicas são necessários para deteção de movimento no eixo central e lateral ao campo de visão.

Dado o elevado interesse que as empresas de iluminação têm demonstrado na incorporação do nível de luminância mesópica em estudos luminotécnicos, os dois projetos referidos pretendem criar um modelo baseado no desempenho da visão mesópica a ser integrado na norma Europeia (CEN – *European Committee for Standardization*) e Norte Americana (IESNA – *Illuminating Engineering Society of North America*) de forma a contribuir para o desenvolvimento de uma fotometria mesópica normalizada.

2.3 Normas Europeias, Recomendações e Documentos Referência de iluminação pública

2.3.1 Norma Europeia EN13201

Identificada a importância de um sistema de iluminação pública com parâmetros fotométricos adequados às necessidades de segurança e conforto dos utilizadores das vias públicas, a CEN (Comissão Europeia de Normalização) desenvolveu a norma europeia EN13201⁶.

A norma europeia EN13201 *Road lighting* foi dividida em quatro partes e desenvolvida com os objetivos de: i) fornecer uma metodologia de seleção da situação e classe de iluminação para cada tipo de área exterior pública com tráfego pedestre ou motorizado com base em requisitos geométricos da área considerada, tipo de uso da área e influência do ambiente envolvente – EN 13201-1 [23]; ii) definir valores fotométricos ótimos para cada classe de iluminação – EN13201-2, iii) desenvolver um método de rede de cálculo para definição da área relevante⁷ e medição dos parâmetros fotométricos presentes nessa mesma área – EN13201-3; iv) sugerir métodos de medição do desempenho da iluminação nos sistemas já instalados – EN13201-4. Com a aplicação da norma em sistemas de iluminação fixa pretende-se providenciar boa visibilidade aos utentes das áreas exteriores públicas com tráfego durante as horas noturnas promovendo a segurança do fluxo automobilístico ou pedestre e a proteção pública dos utentes.

No que diz respeito à norma EN13201-1 o processo de classificação da situação de iluminação de uma via pública serve de base para definição das exigências de iluminação dessa via, ou seja, conhecendo a situação de iluminação é possível definir a sua classe de iluminação.

⁶ Existe uma norma britânica que apresenta um método de dimensionamento do sistema de iluminação para cada tipologia de estrada: BS 5489-1:2003 - *Code of practice for the design of road lighting — Part 1: Lighting of roads and public amenity areas*

⁷ Parte da área considerada de circulação pública

Sabendo as condições de circulação da área relevante é possível determinar a situação de iluminação através da consulta da Tabela 1. A descrição da composição da área relevante para os conjuntos de situação de iluminação A,B,C, D e E pode ser consultada na norma EN13201-1.

Tabela 1 – Agrupamento de situações de iluminação [23]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1)

Velocidade típica dos utilizadores principais (km/h)	Tipos de utilizadores na mesma área relevante			Conjunto de situações de iluminação
	Utilizadores principais	Outros utilizadores permitidos	Utilizadores excluídos	
> 60	Tráfico Motorizado		Veículos de marcha lenta; Ciclistas; Pedestres	A1
		Veículos de marcha lenta	Ciclistas; Pedestres	A2
		Veículos de marcha lenta; Ciclistas; Pedestres		A3
> 30 e ≤ 60	Tráfico Motorizado; Veículos de marcha lenta	Ciclistas; Pedestres		B1
	Tráfico Motorizado; Veículos de marcha lenta; Ciclistas	Pedestres		B2
	Ciclistas	Pedestres	Tráfico Motorizado; Veículos de marcha lenta	C1
> 5 e ≤ 30	Tráfico Motorizado; Pedestres		Veículos de marcha lenta; Ciclistas	D1
		Veículos de marcha lenta; Ciclistas		D2
	Tráfico Motorizado; Ciclistas	Veículos de marcha lenta; Pedestres		D3
Velocidade de caminhada	Tráfico Motorizado; Veículos de marcha lenta; Ciclistas; Pedestres			D4
	Pedestres		Tráfico Motorizado; Veículos de marcha lenta; Ciclistas	E1
		Tráfico Motorizado; Veículos de marcha lenta; Ciclistas		E2

As classes de iluminação são específicas para cada área relevante, ou seja, para cada conjunto de situações de iluminação definido na Tabela 1, as classes de iluminação são dadas pelas tabelas presentes no Anexo A da norma EN13201-1 segundo parâmetros específicos da área relevante. Cada conjunto de iluminação tem associado duas tabelas, uma com um índice ímpar e outra com um índice par:

- Nas tabelas de índice ímpar, como a Tabela 2 (exemplo da Tabela A.1 da norma EN13201-1), considera-se os parâmetros específicos da área relevante e seleciona-se uma “caixa” que contém um intervalo de três classes de iluminação recomendado para a situação particular.

Tabela 2 – Intervalo recomendado de classes de iluminação [23]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1)

Tipo principal de clima	Separação de faixas de rodagem	Tipos de cruzamentos		Volume de tráfico de veículos por dia (nº veículos/dia)								
		Cruzamentos de autoestradas (<i>interchanges</i>) (distância entre acessos, km)	Cruzamentos simples (densidade de cruzamento, unidades/km)	< 15 000			Entre 15 000 e 25 000			> 25 000		
				←	0	→	←	0	→	←	0	→
Seco	Sim	> 3		ME5	ME4	ME3a	ME4a	ME3a	ME2	ME4a	ME3a	ME2
		≤ 3		ME4a	ME3a	ME2	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1
			< 3	ME5	ME4a	ME3a	ME5	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2
			≥ 3	ME4a	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1
	Não	> 3		ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1	ME3a	ME2	ME1
		≤ 3		ME3a	ME2	ME1	ME3a	ME2	ME1	ME2	ME2	ME1
			< 3	ME4a	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1
			≥ 3	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1	ME2	ME2	ME1
Molhado				Escolher como acima, mas substituir por classe MEW								

- Nas tabelas de índice par, como a Tabela 3 (exemplo da Tabela A.2 da norma EN13201-1), a seleção do ícone, responsável pela seleção da classe de iluminação dentro do intervalo recomendado, é realizado segundo parâmetros específicos da área relevante:
 - Uma seta para a esquerda indica a classe de iluminação presente no lado esquerdo do intervalo recomendado.
 - Uma seta para a direita indica a classe de iluminação presente no lado direito do intervalo recomendado.
 - Um 0 indica a classe de iluminação presente no centro do intervalo recomendado.

Tabela 3 – Seleção do ícone para o intervalo recomendado [23]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1)

Área de Conflito ⁸	Complexidade do campo visual	Dificuldade da tarefa de condução	Luminosidade ambiente		
			Baixo (arredor campestre)	Médio (arredor urbano)	Alto (arredor do centro da cidade)
Não	Normal	Normal	←	←	0
		Maior que o normal	0	0	→
	Elevado	Normal	←	0	0
		Maior que o normal	0	→	→
Sim			→		

⁸ Superfícies nas quais ocorre o entrecruzamento de diversos fluxos do tráfego motorizado, ou superfícies também utilizadas por outros participantes do tráfego.

Com a classe de iluminação definida para a área relevante, com recurso à norma EN13201-2 consegue-se saber as exigências fotométricas dessa classe. Por exemplo, a Tabela 4 apresenta os requisitos fotométricos da classe ME. Para as restantes classes, MEW, CE, S, A, SE e EV é necessário a consulta da norma EN13201-2.

Tabela 4 – Requisitos fotométricos das classes de iluminação ME [10]. (Adaptado para Português da norma EN13201-1)

Classe	Luminância da superfície da estrada da faixa de rodagem para condições de superfície de estrada seca			Encadeamento Perturbador	Iluminação envolvente
	L_{med} mínimo (cd/m^2)	U_0 mínimo	U_L mínimo	TI máximo (%)	SR mínimo
ME1	2,0	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
ME3a	1,0	0,4	0,7	15	0,5
ME3b	1,0	0,4	0,6	15	0,5
ME3c	1,0	0,4	0,5	15	0,5
ME4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
ME4b	0,75	0,4	0,5	15	0,5
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	não é requerido

A luminância média na superfície da estrada (L_{med}), a uniformidade global da luminância (U_0), a uniformidade longitudinal da luminância (U_L), o encadeamento perturbador (TI) e a iluminação envolvente (SR) devem ser calculados e medidos de acordo com as normas EN 13201-3 e EN 13201-4.

A norma Europeia EN13201-3 [7], *Road lighting - Part 3: Calculation of performance*, define uma metodologia para o cálculo/medição de quantidades fotométricas, luminância (cd/m^2) e iluminação (lux), segundo um campo de cálculo/medição para a área relevante definida.

Como se representa na Figura 13, na direção longitudinal da área relevante, o campo de cálculo/medição deve situar-se entre duas luminárias na mesma linha, sendo que a primeira luminária tem de estar afastada 60m do observador. A Figura 14 apresenta exemplos da posição do observador e campo de cálculo/medição para várias configurações do sistema de iluminação. Para cálculos de luminância, deve-se considerar que a vista do observador se encontra 1,5m acima da superfície da estrada e a sua localização, na direção transversal, deve ser no centro de cada via de trânsito.

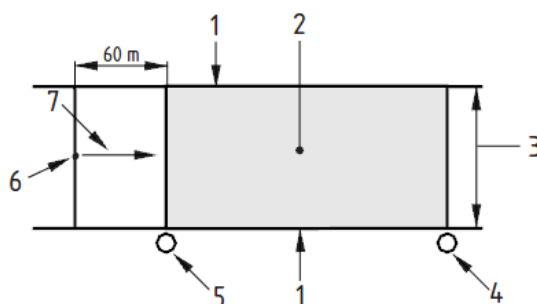


Figura 13 – Campo de cálculo/medição de luminância para a área relevante. 1 – Limite da área relevante; 2 – Campo de cálculo; 3 – Largura da área relevante; 4 – Última luminária do campo de cálculo; 5 – Primeira luminária do campo de cálculo; 6 – Observador; 7 – Direção de observação

A norma Europeia EN13201-3 determina ainda que o espaçamento de pontos na direção longitudinal e transversal deve ser calculado de acordo com as equações (15) e (16) respetivamente. Os pontos próximos ao limite do campo de cálculo têm um espaçamento de $d/2$.

$$D = \frac{S}{N} \quad (15)$$

Onde,

D – é o espaçamento entre os pontos na direção longitudinal, em metros.

S – é o espaçamento entre as luminárias na mesma linha, em metros.

N – é o número de pontos de cálculo na direção longitudinal, considerando que para $S \leq 30\text{m}$, $N=10$ e para $S > 30\text{m}$, o menor inteiro é $D \leq 3\text{m}$.

$$d = \frac{W_L}{3} \quad (16)$$

Onde,

d – é o espaçamento entre os pontos na direção transversal, em metros.

W_L – é a largura da faixa de rodagem, em metros.

Para a determinação de valores de iluminância (lux), o campo de cálculo/medição da luminância apresenta a mesma configuração apresentada na Figura 13. Entretanto, o espaçamento entre os pontos de cálculo/medição são diferentes na direção transversal, Figura 16, porque como não existe influência da posição do observador, há possibilidade de escolher um maior número de pontos a calcular/medir.

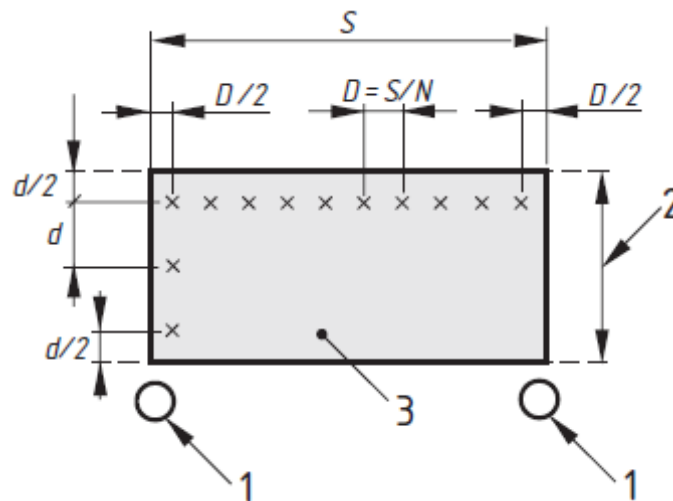


Figura 16 – Configuração, para cálculo de valores de iluminância, dos pontos de cálculo/medição na área relevante definida. 1 – Luminária; 2 - Largura da área relevante; 3 – Campo de cálculo; X – Linhas de pontos de cálculo nas direções transversal e longitudinal.

Os espaçamentos entre os pontos na direção longitudinal são calculados segundo a equação (15), no entanto o espaçamento entre os pontos na direção transversal deve ser determinado segundo a equação (17).

$$d = \frac{W_r}{n} \quad (17)$$

Onde,

d – é o espaçamento entre os pontos na direção transversal, em metros.

W_r – é a largura da faixa de rodagem ou da área relevante, em metros.

n – é o número de pontos na direção transversal com valor maior ou igual a 3 e com limite de espaçamento de $d \leq 1,5\text{m}$.

As fórmulas de cálculo do valor de iluminância e luminância num ponto foram referidas na Secção 2.1.3 e Secção 2.1.4, respetivamente.

As fórmulas de cálculo das características de qualidade fotométricas, como a luminância média, uniformidade global e longitudinal, encadeamento perturbador e iluminação envolvente, foram referidas na Secção 2.1.4, Secção 2.1.5, Secção 2.1.6, Secção 2.1.7 e Secção 2.1.8, respetivamente.

A norma Europeia EN13201-4 [24], *Methods of measuring lighting performance*, define um conjunto de procedimentos e convenções uteis para a medição de parâmetros fotométricos, valores de iluminância e luminância de instalações de iluminação rodoviária. Sugere também a monitorização da rede elétrica, utilizando, por exemplo, um analisador de potência, durante o processo de medição.

A medição das iluminâncias deve ser feita com um luxímetro. Para medições da iluminância horizontal, a superfície ótica sensível do luxímetro deve posicionar-se na horizontal e para cima, sobre a superfície da estrada. Esta operação deve ser feita para cada ponto presente no campo de medição, Figura 16, definido para a área relevante.

A medição de luminâncias é um processo mais complexo porque tem um conjunto de fatores que dependem do ângulo de visão do observador e de um equipamento específico, luminancímetro. Assim sendo, recomenda-se a leitura da norma EN13201-4 para uma melhor compreensão.

De forma a organizar todos os dados obtidos, a norma disponibiliza um exemplo de um formato de relatório. Este relatório apresenta-se no Anexo II – Relatório da medição no dia 6/11/2012 segundo o formato do relatório teste do Anexo A da norma EN13201-4 com algumas alterações e devidamente preenchido

2.3.2 Documento de Referência para a Eficiência Energética na Iluminação Pública (DRREIP)

O objetivo do DRREIP [9], de uma forma simplificada, é o de referenciar um conjunto de parâmetros técnicos que devem acompanhar num projeto de Iluminação Pública (IP) de modo a alcançar-se uma maior eficiência energética desta tipologia de instalações. A aplicação do DRREIP, no âmbito deste estudo, é feita no sentido de avaliar o fator de manutenção do sistema de iluminação e determinar a respetiva classe de eficiência energética.

O fator de manutenção de um sistema de iluminação é uma medida das necessidades de intervenção para manutenção sobre o sistema associadas a fatores como a perda de emissividade das lâmpadas ou a sua vida média, que varia entre 0 e 100%, correspondendo neste último caso a nenhuma necessidade de intervenção durante 3 anos. Este fator influencia fortemente a eficiência energética proporcionada pelo sistema. Assim, de forma a atingir maiores poupanças energéticas é importante que o sistema de iluminação tenha um fator de manutenção global (F_m) elevado. Este fator depende do fator de manutenção da luminosidade da lâmpada/fonte de luz (FMLL), do fator de sobrevivência da lâmpada/fonte de luz (FSL) e fator de manutenção da luminária (FML). Os fatores FML e FSL são fornecidos pelo fabricante, e devem ser considerados os valores correspondentes a 12000h de tempo de operação (3anos), enquanto o fator FML é obtido através da correspondência dos dados do

fabricante à tabela presente no DRREIP. Desta forma, o fator de manutenção global determina-se a partir da Equação (18) [9].

$$Fm = FMLL \times FSL \times FSL \quad (18)$$

A classe de eficiência energética do sistema de iluminação (lm/W) é definida como a razão entre o produto da superfície iluminada pela iluminação média em serviço da instalação e a potência total instalada, como mostra a Equação (19) [9].

$$\varepsilon = \frac{k \times S \times E}{P} \quad (19)$$

Onde,

ε – Eficiência energética da instalação (lm/W)

S – Área total resultante do produto do valor da interdistância entre pontos de luz e largura total da via e passeios, no caso do perímetro urbano, de fachada a fachada (m²). A Figura 17 mostra um exemplo de como definir as áreas a calcular.

E – Valor médio de iluminância calculado (lux)

P – Potência total das luminárias mais auxiliares intervenientes na área calculada (W)

k – Fator de correção. Tem o valor 1 se L (componente transversal da área calculada) for superior a 6 metros; Tem o valor 1,33 se L < 1,33 metros

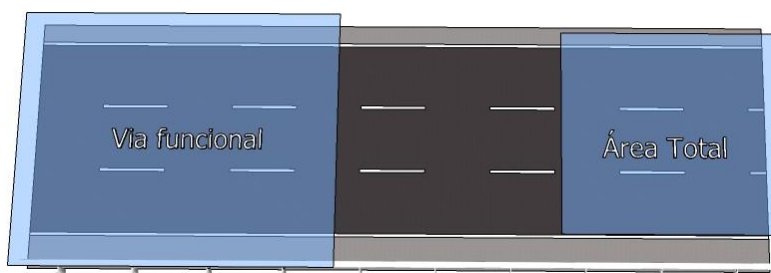


Figura 17 – Exemplo das áreas referidas no cálculo do parâmetro S da Equação (19) [9].

Assim, como mostra a Figura 18, a classe energética mais eficiente corresponde à letra A e a menos eficiente à letra G.

Classe Energética	Eficiência Energética (lm/W)
A	$\varepsilon > 40$
B	$40 \geq \varepsilon > 35$
C	$35 \geq \varepsilon > 30$
D	$30 \geq \varepsilon > 25$
E	$25 \geq \varepsilon > 20$
F	$20 \geq \varepsilon > 15$
G	$\varepsilon \leq 15$

Figura 18 – As várias classes energéticas e respetivos intervalos de eficiência energética (lm/W) [9].

2.3.3 Recomendações do relatório técnico CIE 115:2010 – *Lighting of roads for motor and pedestrian traffic*

Esta recomendação é uma revisão e melhoramento da recomendação CIE 115:1995 *Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic* [11] que tem como objetivo simplificar o método de classificação da norma EN13201 e recomendar um algoritmo de avaliação de custos e rentabilidade de um sistema de iluminação, com base no ciclo de vida do mesmo.

O algoritmo sugerido pela recomendação CIE 115:2010, presente no Anexo A do documento [11], foi utilizado neste estudo com o objetivo de avaliar os custos e a rentabilidade de um sistema de iluminação durante o tempo de vida, quer este esteja já instalado, Secção 6.1, em processo de remodelação, Secção 6.2, ou mesmo em desenvolvimento para uma nova estrada.

A avaliação dos custos de um sistema de iluminação rodoviário é baseada no método do custo do ciclo de vida (*Life cycle costs method*, LCC). O ciclo de vida consiste em fases consecutivas e interligadas de um sistema, desde aquisição de matéria-prima ou produção de recursos naturais à eliminação definitiva [11]. Os custos do ciclo de vida incluem instalação, manutenção, energia, demolição, reciclagem e custos de eliminação definitiva [11]. Para determinar os custos do ciclo de vida de um sistema de iluminação rodoviário foi necessário calcular os custos da instalação e operação do sistema.

Os custos de instalação por metro de estrada são traduzidos Equação (20), e incluem três contribuições representando respectivamente: i) o custo das colunas de iluminação e respetiva fundição; ii) o custo das luminárias e respetivas lâmpadas; iii) o custo dos encargos com a construção de elementos de ligação para uso exclusivo de baixa tensão;

$$C_{in} = \frac{m \times C_{co} + n \times C_{lu} + S \times C_{ps}}{S} \quad (20)$$

Na expressão (20), C_{in} representa os custos da instalação (€/m), m o número de colunas presentes no campo de cálculo, C_{co} o custo da coluna e fundação por unidade (€/unid), n o número de luminárias presentes no campo de cálculo (*cross-section*), C_{lu} o custo da luminária e a primeira lâmpada (€), S o espaçamento entre colunas (m) e C_{ps} o custo da rede elétrica desde do quadro (incluindo cabos, mão-de-obra, valas, etc.) por metro de estrada (€/m).

Os custos de operação por metro de estrada são traduzidos pela Equação (21), e incluem quatro contribuições representando respectivamente: i) o custo da energia consumida pelo sistema de iluminação; ii) o custo de operações de substituição de lâmpadas em conjunto; iii) o custo de operações de substituição de lâmpadas individualmente; iv) o custo de manutenção da parte mecânica das luminárias.

$$C_{op} = \frac{t_1 \times n \times P_{lu} \times C_{en} + \frac{n \times C_{gr}}{t_2} + q \times n \times C_{ir} + m \times C_{fi}}{S} \quad (21)$$

Na expressão (21), C_{op} representa o custo de operação no primeiro ano, por metro de estrada (€/m), t_1 tempo anual de funcionamento da iluminação (h), t_2 tempo de vida da lâmpada (a), n o número de luminárias presentes no campo de cálculo (*cross-section*), P_{lu} a potência da luminária (kW), C_{en} o custo da energia (€/kWh), C_{gr} o custo da substituição conjunta das lâmpadas por unidade (€/unid), C_{ir} o custo da substituição individual da lâmpada por unidade (€/unid), q o número estimado de substituição individual de lâmpadas por ano (1-Fator de Manutenção, F_m), m o número de colunas presentes no campo de cálculo, C_{fi} os custos fixos por coluna (€) e S o espaçamento entre colunas (m).

Assim, os custos do ciclo de vida por metro de estrada de um sistema de iluminação rodoviário são obtidos pelo método dos custos médios anuais (*average annual costs method*):

$$C_{aa} = CRF \times C_{in} + Gf \times C_{op} \quad (22)$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^t}{(1 + i)^t - 1} \quad (23)$$

$$Gf = (1 + i_{op})^t \quad (24)$$

Na expressão (22), C_{aa} representa o custo do ciclo de vida do sistema de iluminação (€/m), C_{in} os custos da instalação (por metro de estrada) (€/m), CRF é o fator de recuperação de capital (*Capital recovery factor*), Gf é o fator de crescimento dos custos de operação, i_{op} é a taxa de crescimento anual dos custos de operação, t é o número de anos de serviço do sistema de iluminação (anos), i é a taxa de juro aplicada (%/100) e C_{op} representa o custo de operação no primeiro ano por metro de estrada (€/m).

A análise da rentabilidade de um sistema de iluminação rodoviário em termos de tráfego económico é realizada por comparação das poupanças médias anuais nos custos total do tráfego rodoviário combinado com os custos da iluminação e colisões nas colunas. O volume de tráfego requerido para tornar o sistema de iluminação rentável é obtido através da realização da análise após passado metade do tempo de vida útil (t é usualmente 20 anos) do sistema de iluminação e é traduzido por:

$$V_{ADT} = \frac{10^8 \times R_{bc} \times \left[C_{aa} + b \times N_c \times C_{cc} \times \left(1 + \frac{r_1}{100} \right)^{\frac{t}{2}} \right]}{365 \times b \times \left[1,1 \times p \times d \times g \times C_{pa} \times \left(1 + \frac{r_2}{100} \right)^{\frac{t}{2}} + S_{tv} \right]} \quad (25)$$

Na expressão (25), V_{ADT} representa o volume de tráfego médio diário (veículos/dia), R_{bc} a razão benefício – custo (*benefit-cost ratio*), C_{aa} representa o custo do ciclo de vida do sistema de iluminação (€/km), b a taxa de crescimento do tráfego, N_c número de colunas por km, C_{cc} custos da colisão numa coluna (€), r_1 o crescimento anual nos custos de colisões nas colunas (%), t o tempo de vida útil do sistema de iluminação (anos), p a proporção do tráfego noturno, d a redução dos acidentes noturnos devido à iluminação rodoviária, g a taxa de acidentes na secção de estrada (acidentes/(10^8 veículo km), C_{pa} os custos de acidentes (€), r_2 o crescimento anual nos custos dos acidentes (%), S_{tv} a poupança nos custos de tempo por veículo.km. No entanto, a indisponibilidade de dados não permite o cálculo deste fator.

3. Tecnologia de iluminação: Tipo de fonte de luz e equipamentos constituintes

Os componentes de um sistema de iluminação rodoviária podem ser agrupados de acordo com as suas funções: i) Estrutura – fundações, colunas de iluminação e armadura; ii) Sistema Ótico – Difusores/Refratores e Refletores; iii) Sistema Eléctrico – Balastros e Lâmpadas.

Com o crescimento competitivo do sector tecnológico, associado aos sistemas de iluminação e de electrónica de potência, as empresas trabalham de forma a desenhar luminárias com baixo custo de aquisição e baixo custo de manutenção e operação durante o seu ciclo de vida, elevada eficiência energética (otimização entre o balastro e a lâmpada proporcionando uma maior quantidade de fluxo luminoso por Watt), baixo encadeamento, baixa poluição luminosa e correspondência do espectro de distribuição de potência com espectro de sensibilidade da visão humana para cada nível de iluminação.

O principal elemento do sistema de iluminação que determina a qualidade da visão, o custo económico e aspetos relacionados com eficiência energética da luminária é a fonte de luz. Uma fonte eléctrica de luz é um equipamento que converte a energia eléctrica, ou potência (W), em radiação visível eletromagnética, ou luz (lumens) [25]. A razão de conversão de energia eléctrica em luz visível tem o nome de “eficácia luminosa” e tem unidades de lumens por watt.

As lâmpadas comuns em sistemas de iluminação rodoviários, com potência elevada, estão agrupadas nos principais tipos de tecnologia de iluminação, consoante as suas características funcionais: i) Alta intensidade de descarga (AID) (*High Intensity Discharge, HID*), ii) Indução (*Induction, IND*). Atualmente tem-se verificado a implementação de luminárias LED (*Solid-State Lighting, SSL*) nos sistemas de iluminação rodoviária, no entanto, dadas as características da iluminação LED, podem não ser a melhor solução para uma remodelação do sistema de iluminação, devido à elevada altura dos postes entre outros fatores.

Nos seguintes subcapítulos serão abordados em pormenor cada tecnologia de iluminação e os sistemas de redução do fluxo luminoso com potencial de serem instalados na auto-estrada e que foram alvo de análise do seu desempenho na Secção 6.

3.1 Alta intensidade de descarga (AID) (*High Intensity Discharge, HID*)

As lâmpadas de alta intensidade de descarga (AID), presentes na Figura 19, apresentam um funcionamento muito semelhante a uma lâmpada de arco/descarga convencional e dividem-se em três tipos: Vapor de Mercúrio (VM), Iodetos Metálicos (IM) e Vapor de Sódio de Alta Pressão (VSAP). Estas lâmpadas apesar de partilharem um conjunto de características de operação e *design*, apresentam diferenças importantes entre si: 1) as lâmpadas de vapor de mercúrio e iodetos metálicos são preenchidas com hidrogénio, que absorve a radiação ultra-violeta (UV) produzida durante a operação, enquanto nas lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão é criado um vácuo no interior da lâmpada de forma a isolar o tubo de arco das variações da temperatura ambiente; 2) A iniciação do funcionamento da lâmpada (*Lamp start-up*) não é a mesma para todas as lâmpadas AID, porque as lâmpadas de vapor de mercúrio e iodetos metálicos apresentam dois elétrodos principais (*main electrodes*) no interior do tubo de arco, como nas lâmpadas VSAP, mais um elétrodo de iniciação (*starting electrode*) próximo a um dos elétrodos principais do tubo de arco (*probe-start technology*). Este elétrodo de iniciação permite que as lâmpadas de vapor de mercúrio e iodetos metálicos entrem em funcionamento com recurso a uma tensão inicial mais baixa (*lower start-up voltage*) porque o campo eléctrico é produzido entre o elétrodo principal e o elétrodo de iniciação presente a seu lado. As lâmpadas VSAP apresentam um tubo de arco com espaço apenas para os elétrodos principais sendo necessário uma elevada tensão inicial, entre 3 a 4kV, aplicada no período de ignição pelo *ignitor* (*Pulse-start technology*).

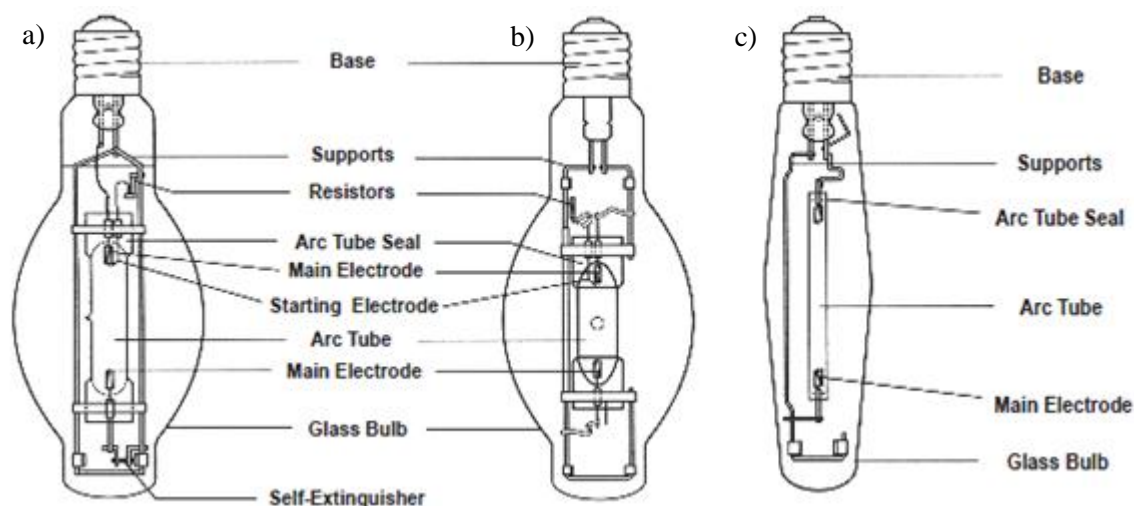


Figura 19 – Esquema dos três tipos de lâmpada de alta intensidade de descarga: a) Vapor de Mercúrio; b) Iodetos Metálicos; c) Vapor de Sódio de Alta Pressão [26]

De uma forma geral, a lâmpada de alta intensidade de descarga inicia-se com a aplicação de uma tensão elevada (*start-up voltage*) através do tubo para ionizar os átomos do gás (*starting gases* como Árgon, Néon ou Xénon e *arc metals* como mercúrio, iodetos e sódio) contido no tubo de arco. Após o gás estar completamente ionizado, inicia-se um arco eléctrico contínuo entre os dois eléctrodos de tungsténio presentes no interior do tubo. O arco contínuo consiste num movimento rápido de ambos electrões e metais de manutenção do arco eléctrico (*charged arc metal ions*). Os átomos presentes no tubo vaporizam, através das suas colisões e devido ao aumento da pressão e temperatura, e a luz é emitida em forma de luz visível e radiação no comprimento de onda da gama do ultravioleta (UV). O invólucro exterior da lâmpada providencia um ambiente térmico estável, prevenindo a oxidação do tubo de arco da lâmpada, e reduz a quantidade de radiação ultravioleta emitida pela lâmpada [27]. A cor da luz é uma característica do comprimento de onda do espectro de luz dos metais (*arc metals*) contidos no tubo de descarga.

A família de lâmpadas AID tem requisitos rigorosos, no início e durante o seu funcionamento, que têm de ser cumpridos de forma a atingir um funcionamento ótimo. Como mostra a Figura 20, as lâmpadas AID requerem uma tensão elevada para acenderem (ignição) (tipicamente 3 a 4 kV, > 20 kV se a lâmpada estiver quente), uma limitação da corrente durante o seu aquecimento e uma potência constante no período de funcionamento. Para responder a estes requisitos nas diferentes fases de operação, é necessário um balastro eletrónico ou ferromagnético que permita limitar a corrente, controlar a potência fornecida e a tensão no arco eléctrico. Para as luminárias com lâmpadas VSAP, é necessário um arrancador externo (*ignitor*) para aumentar a tensão de fornecimento à lâmpada de 120V ou 240V para 2,5kV ou 4kV necessários para iniciar a lâmpada e um condensador caso pretenda-se corrigir o fator de potência.

O período de ignição apresenta um tempo entre 1-15 microssegundos com taxa de repetição mínima de um impulso por ciclo [26], enquanto o tempo de aquecimento (*warm-up*) varia entre 1-4 minutos para lâmpadas com tecnologia *pulse-start* e 2-15 minutos para lâmpadas com tecnologia *probe-start* [28].

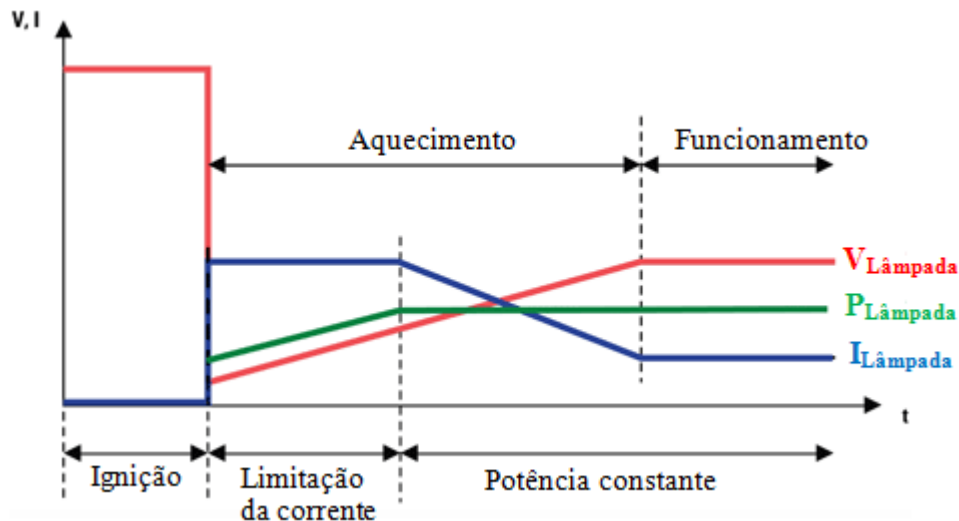


Figura 20⁹ – Comportamento elétrico típico, nas diferentes fases de operação, de uma lâmpada AID [27]. O eixo de coordenadas 'xx' é tempo (t) e o eixo de coordenadas 'yy' é tensão (V) e corrente (I).

(Adaptado para Português).

Esta família de lâmpadas é usada maioritariamente em iluminação exterior, como ruas e estradas, e iluminação de edifícios industriais.

3.1.1 Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão, VSAP (*High Pressure Sodium*)

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão, como mostra a Figura 21, não apresenta um eléctrodo de iniciação no interior do tubo de arco, sendo necessário a aplicação de um impulso de tensão elevada para que seja criado um arco eléctrico no intervalo entre os eléctrodos principais. Este impulso é aplicado por um arrancador externo (tecnologia *pulse-start*) separado do balastro. No momento que o arco é criado, o impulso de tensão é desligado.

Os metais de Sódio e Mercúrio presentes no tubo de descarga vaporizam rapidamente de forma a integrarem no arco, enquanto a corrente aumenta e estabiliza [26]. No geral, o princípio de funcionamento é idêntico ao apresentado na Secção 3.1, no entanto as lâmpadas VSAP não têm o eléctrodo de ignição integrado no tubo de descarga mas o pulso de tensão é fornecido por um circuito de ignição separado do balastro.

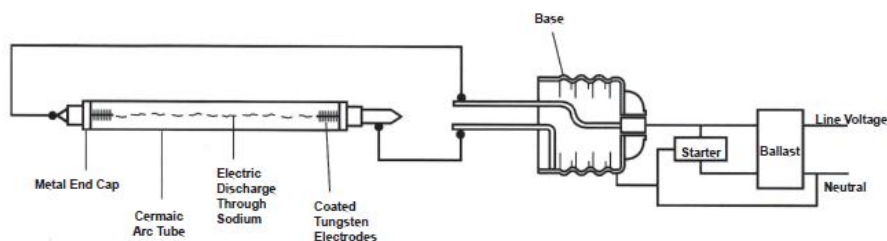


Figura 21 – Exemplo de uma lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão [26].

⁹ Antes do pulso de ignição, a lâmpada encontra-se em circuito-aberto. Depois do período de ignição, a tensão da lâmpada diminui rapidamente da tensão de circuito-aberto para um valor de tensão próximo dos 20V devido à baixa resistência da lâmpada. Esta situação faz com que a corrente da lâmpada aumente para valores elevados e que devem ser limitados para um valor máximo seguro (limitação da corrente). Com o aquecimento da lâmpada, a corrente diminui com o aumento da tensão e da potência. Posteriormente, a tensão da lâmpada atinge o seu valor nominal (normalmente são 100V), e a potência é regulada para um nível constante.

A luz produzida apresenta uma cor amarelada devido ao espectro emitido pela lâmpada ter valores de potência radiativa elevados no comprimento de onda entre os 560nm e 600nm, como mostra a Figura 22. Este tipo de lâmpadas é bastante usado nos sistemas de iluminação rodoviária porque apresentam uma boa eficácia luminosa fotópica (lm/W), um longo tempo de vida (+ 30 000 h) e um elevado fluxo luminoso por área iluminada. As desvantagens são os baixos valores de temperatura de cor (K) e índice de reprodução de cor, o “preço” a pagar para uma maior eficácia luminosa, e o período de 3 a 4 minutos de ligação [29].

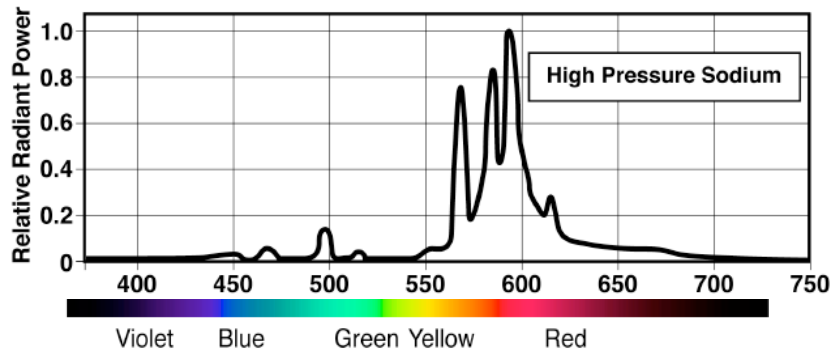


Figura 22 – Distribuição do espectro de potência típica de uma lâmpada de Vapor de Sódio Alta Pressão (*High Pressure Sodium*) [18].

A Tabela 5 mostra um resumo das principais características luminotécnicas que devem ser consideradas na escolha de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão para uma aplicação de iluminação exterior.

Tabela 5 – Valores típicos das características luminotécnicas para a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

Tipo de lâmpada	Eficácia Luminosa (lm/W) [30]	Tempo de vida (h) [29]	Manutenção do fluxo luminoso (lúmen) (vida média) [29]	Tempo de aquecimento (minutos) [29]	Índice de reprodução de cor [29]	Temperatura de cor (K) [29]
Vapor de Sódio de Alta Pressão	80 – 100	+30000	90%	3-4	21 – 25	1800 – 2700

3.1.2 Lâmpada de Iodetos Metálicos, IM (*Metal Halide*)

As lâmpadas de Iodetos Metálicos dividem-se em dois tipos, consoante o tipo de construção do tubo de descarga: i) Lâmpada de Iodetos Metálicos com tubo de descarga cerâmico (*Ceramic Metal Halide*); ii) Lâmpada de Iodetos Metálicos com tubo de descarga em quartzo (*Quartz Metal Halide*).

As lâmpadas tradicionais de iodetos metálicos com tubo de descarga em quartzo são em tudo, construção e aparência, similares às lâmpadas de vapor de mercúrio mas ao ser adicionado um gás de iodetos metálicos ao gás de mercúrio presente no interior da lâmpada, resulta numa maior quantidade luz emitida, numa eficácia luminosa elevada (lm/W) e num índice de reprodução de cor elevado [29]. A Tabela 6 apresenta alguns valores típicos.

Tabela 6 – Valores típicos das características luminotécnicas para a lâmpada de Iodetos Metálicos.

Tipo de lâmpada	Eficácia Luminosa (lm/W) [30]	Tempo de vida (h) [29]	Manutenção do fluxo luminoso (lúmen) (vida média) [29]	Tempo de aquecimento (minutos) [29]	Índice de reprodução de cor [29]	Temperatura de cor (K) [29]
Iodetos Metálicos (Cerâmica)	50 – 100	9000 – 20000	85% - 90%	2	81 – 95	2900 – 4200

A diferença entre o tubo de descarga em cerâmica e em quartzo é a maior resistência do primeiro à corrosão dos sais de iodetos metálicos criados no interior do tubo de descarga [29]. Esta resistência permite que as lâmpadas de iodetos metálicos com tubo de descarga em cerâmica operem a elevadas temperaturas, melhorando o seu desempenho e as características da qualidade da luz como a manutenção do fluxo luminoso (> 10 – 30%), um elevado índice de reprodução de cor, devido a um espectro de potência emitido num intervalo amplo de comprimento de onda (Figura 23), e uma diminuição na variação da cor.

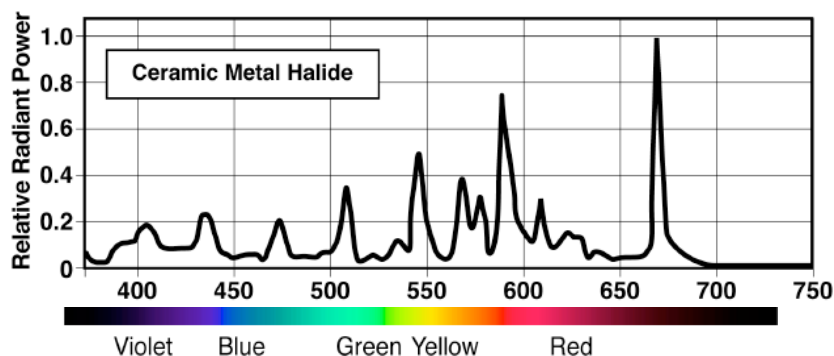


Figura 23 – Distribuição do espectro de potência¹⁰ típica de uma lâmpada *Ceramic Metal Halide* [18].

3.2 Lighting Emitting Diodes, LED

Os díodos emissores de luz (LED) juntamente com os díodos orgânicos emissores de luz (OLED) e os polímeros emissores de luz (LEP) fazem parte da família *Solid-state lighting* (SSL), porque todos os emissores de luz apresentam um cristal semicondutor onde as cargas (elétrons e buracos) fluem e originam fótons (luz) depois de recombinações radiativas.

As luminárias exteriores LED podem fornecer a iluminância no pavimento necessária usando menos energia com uma uniformidade melhorada, comparado às fontes de alta intensidade de descarga. As luminárias LED têm como vantagem: i) um período de vida longo (> 50 000h), com um fator de manutenção da luminosidade elevado; ii) uma intensidade de luz totalmente regulável, através de reguladores de fluxo; iii) não contêm mercúrio, conferindo segurança para o ambiente e utilizadores; iv) acendem instantaneamente e v) não provoca encadeamento. No entanto, as luminárias LED são muito sensíveis a falhas elétricas e térmicas de dimensionamento que pode levar a uma depreciação rápida da luminosidade ou mesmo falha prematura. Como o sector da tecnologia de iluminação continua a evoluir sempre no sentido de alcançar uma maior eficiência energética, é necessário examinar em detalhe os fatores que estão diretamente ligados com a poupança energética, como a

¹⁰ O espectro de distribuição de uma fonte define a sua cor característica: CCT e CRI. O mesmo não é totalmente verdade para a tecnologia LED.

eficácia energética, a durabilidade, a qualidade da cor, a manutenção da luminosidade e da sobrevivência da fonte de luz, a distribuição da luz, o encadeamento e os custos [31].

A eficácia energética engloba a eficácia luminosa da fonte de luz (lm/W), uma fonte de alimentação adequada, a eficiência ótica da luminária e a precisão no fornecimento unidirecional de luz para a estrada. O objetivo principal é satisfazer os requisitos de iluminância (lux) na estrada, com uma qualidade de iluminação adequada e uma densidade de potência baixa, como mostra a Tabela 7. A Figura 24 mostra a comparação da evolução rápida da eficácia (lm/W) e do preço por 1000lumen (\$/klm) entre o período de 2010-2020.

Tabela 7 – Comparação de valores fotométricos entre luminárias exteriores [31].

	150 W VSAP	150W IM	LED
Potência luminária (W)	183	167	153
CCT (K)	2000	3000	6000
CRI	22	80	75
Luminosidade inicial (lúmen)	16000	11900	-----
Eficiência ótica da luminária (%)	70	81	-----
Luminosidade inicial da luminária (lúmen)	11200	9639	10200
Eficácia da luminária (lm/W)	61	58	67

LAMP TYPE	2010	2012	2015	2020
LED COOL WHITE EFFICACY (LM/WATT)	134	176	224	258
LED COOL WHITE PRICE (US\$/KLM)	\$13	\$6	\$2	\$1
LED WARM WHITE EFFICACY (LM/WATT)	96	141	202	253
LED WARM WHITE PRICE (US\$/KLM)	\$18	\$7.5	\$2.2	\$1

Figura 24 – Evolução dos valores de eficácia e preço para os sistemas LED [32].

No que diz respeito à cor, os fabricantes de luminárias LED preocupam-se em misturar vários LEDs de diferentes comprimentos de onda de forma a atingir uma temperatura de cor (TC) para a luminária, que equilibre uma eficácia energética elevada com o tipo de visão (escotópica e fotópica) dos condutores e respetivos índices de conforto e segurança durante a condução. A Figura 25 mostra um perfil típico de distribuição de espectro de potência de uma luminária LED com uma TC de 5500K.

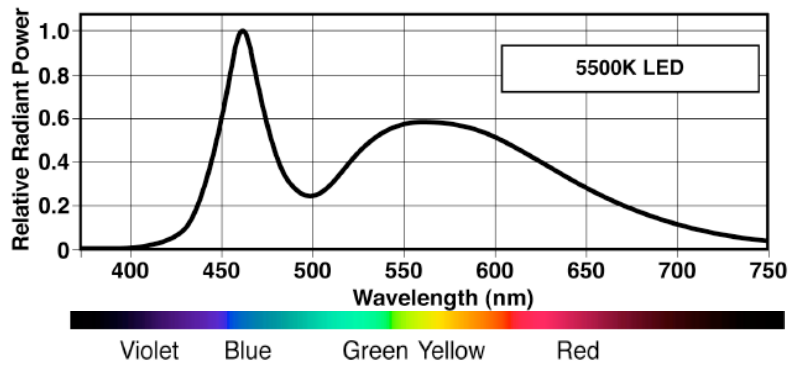


Figura 25 – Distribuição do espectro de potência (*Spectral Power Distribution*) típica de uma lâmpada *White LED* [18].

Os fatores de manutenção da luminosidade da fonte de luz (FMLL) e da sobrevivência da fonte de luz (FSL) das luminárias LED tornam-na uma tecnologia muito atrativa e competitiva, não esquecendo que a tecnologia LED é ainda uma tecnologia atualmente a evoluir rapidamente e com muita margem de crescimento. No entanto, durante a sua evolução, têm sido identificado falhas em pelo menos um dos quatro aspetos funcionais das tarefas de conceção e fabrico de luminárias LED, presentes na Figura 26: Gestão energética (*Power management*), Gestão térmica (*Thermal management*), Gestão ótica (*Optic management*) e montagem da luminária.

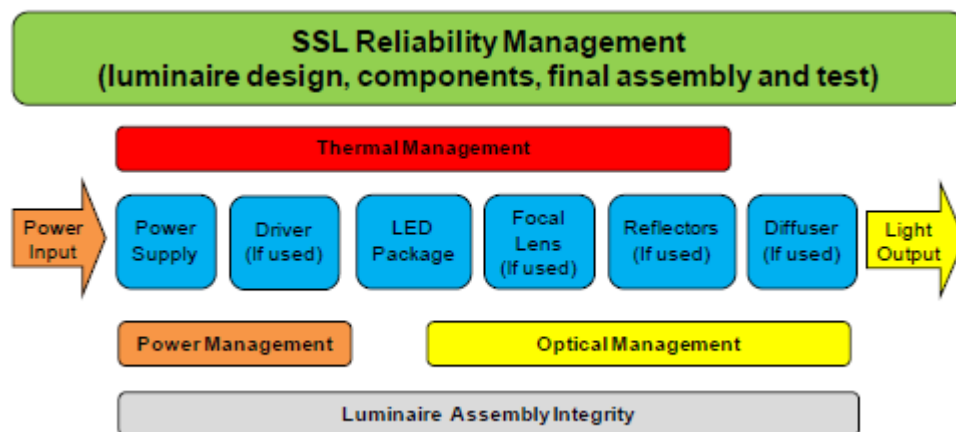


Figura 26 – Componentes da luminária LED (tecnologia SSL) e considerações de fiabilidade [33].

A Figura 27 mostra a frequência das falhas documentadas, nos componentes da luminária LED, durante o período de funcionamento de uma família de luminárias LED instaladas no exterior. É possível perceber que os componentes responsáveis pela regulação da corrente e dissipação do calor têm maior probabilidade de avaria, apesar de terem sido verificadas 29 falhas no conjunto de 5 400 luminárias monitorizadas.

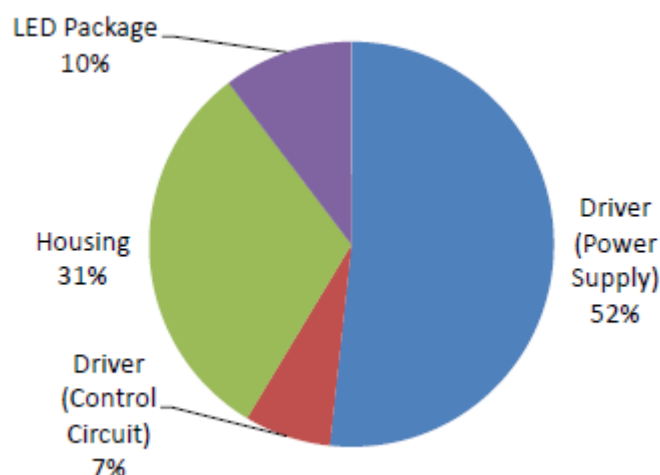


Figura 27 – Distribuição das falhas durante um período de operação de 34 000h para uma família de luminárias instaladas no exterior [33].

A Figura 28 compara as curvas FMLL da tecnologia LED e tecnologia AID. Atualmente, os fabricantes de luminárias LED definem a vida útil da luminária baseada na estimativa do número de horas em que a luminosidade da lâmpada pode operar acima dos 70% da luminosidade inicial. Este valor situa-se atualmente entre as 50 000h e as 150 000h. Normalmente os fabricantes determinam o valor máximo de corrente e a temperatura máxima na junção do LED para qual o LED não se danifica precocemente relativamente a este tempo de vida média. Assim é necessário otimizar os sistemas de refrigeração e os drivers de forma a controlar a corrente máxima e a dissipação de calor para que seja possível atingir tempos de vida útil elevados.

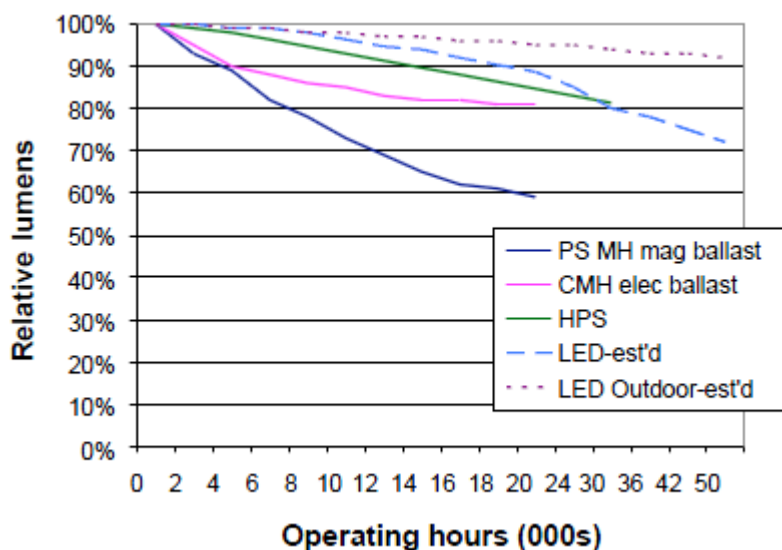


Figura 28 – Curvas típicas de manutenção da luminosidade para a tecnologia alta intensidade de descarga, e curvas estimadas para LED [31].

Como nova tecnologia, e em evolução contínua com grandes perspectivas futuras, as luminárias LED apresentam um elevado custo de investimento comparadas com as luminárias AID. A redução dos custos de operação e manutenção, devido às poupanças energéticas e ao aumento do fator de sobrevivência do ponto de luz pode reduzir o custo do ciclo de vida da luminária. A análise económica de luminárias LED no exterior depende das variáveis geográficas do local, da potência necessária para obter o nível de iluminância adequado para o local, dos custos de aquisição e dos custos de mão-de-obra. Segundo o *U.S Department of Energy* (DOE) os sistemas de iluminação exterior têm apresentado estimativas de períodos de retorno a partir de três anos a mais de 20 anos, dependendo dos pressupostos assumidos, tipo de aplicação e forma de instalação (remodelação ou instalação de raiz) [31]. Para uma maior precisão nas estimativas económicas é necessário haver dados que permitam serem feitos estudos de análise do ciclo de vida dos sistemas de iluminação LED, e há necessidade de normalização para medir o desempenho do funcionamento das luminárias (pouca fiabilidade/comparabilidade dos dados dos fabricantes).

3.3 Sistemas de regulação do fluxo luminoso

Os sistemas de regulação de fluxo luminoso (lm), *dimming*, permitem ajustar os níveis de fluxo luminoso da lâmpada consoante as necessidades pré-determinadas do local, permitindo obter poupanças energéticas minimizando o sobredimensionamento nos períodos em que o fluxo luminoso necessário é inferior ao máximo que pode ser fornecido pela luminária. Os *dimmers* modernos são construídos a partir de retificadores controlados de silício (*Silicon-controlled rectifiers, SCR*), que têm perdas térmicas mais reduzidas. Tipicamente, nestes sistemas, a redução de 25% do fluxo luminoso inicial, apenas leva a uma redução de consumo de eletricidade de 20%, devido às perdas no retificador [30]. Uma das grandes vantagens destes retificadores é serem integrados nos balastros eletrónicos, Figura 29 a), para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, permitindo a programação da variação do perfil de fluxo luminoso no tempo [30]. Entretanto, esta programação só tem 2 passos de redução: Potência reduzida, que permite à lâmpada de vapor de sódio de alta pressão funcionar no seu limite de regulação (60%), ou potência nominal, funcionando à potência nominal da lâmpada. No caso dos LEDs, o regulador de fluxo apresenta maior versatilidade porque permite definir um máximo de 5 períodos com um nível de fluxo luminoso entre os 10% e os 100%. Esta vantagem deve-se à capacidade de os LEDs serem totalmente reguláveis e de acenderem instantaneamente.

Para além das funcionalidades do balastro eletrónico de limitar a corrente, controlar a potência fornecida e a tensão no arco eléctrico, ele também permite a estabilidade da potência nominal e reduzida da lâmpada para variações de tensão aplicadas significativas (-10%; +10%), contrastando com o balastro ferromagnético que aumenta o consumo de energia eléctrica com o aumento da tensão. O balastro eletrónico permite ainda uma distorção harmónica inferior aos limites da norma IEC 61000-3-2, tanto em modo de potência reduzida como em modo de potência nominal, devido ao facto de operar em elevadas frequências (25kHz). Associado a estas vantagens, o balastro eletrónico permite corrigir a forma de onda da corrente (minimizando os harmónicos de corrente), apresenta um elevado fator de potência e controla a corrente de ignição [34].

Todos os benefícios em cima mencionados fazem com que os balastros eletrónicos associados às lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão tornem este tipo de iluminação muito competitivo face à tecnologia *Solid-State Lighting* no mercado da iluminação rodoviária. Isto porque são sistemas mais robustos, com elevado *know-how* da tecnologia e com elevada rentabilidade económica e viabilidade técnica [34]. A rentabilidade económica dos balastros eletrónicos continua a ser uma mais-valia quando comparados com os sistemas remotos de controlo e monitorização disponíveis para as luminárias LED, Figura 29 b), que têm como principal vantagem a capacidade de o fluxo luminoso ser regulado dos 10% aos 100% de forma instantânea e inteligente e de ser possível identificar as falhas e monitorizar o desempenho do sistema de iluminação à distância através da rede *wireless* [35]. No entanto, devido aos elevados custos económicos de investimento, à imaturidade das tecnologias existentes no mercado, ao conhecimento científico específico e limitado sobre o funcionamento e otimização destes sistemas e ter de ser necessário avaliar o desempenho do seu funcionamento caso a caso, estes sistemas inteligentes continuam a ser pouco competitivos face os *dimming drivers* utilizados normalmente nas luminárias LEDs e que serão abordados na Secção 6.2.

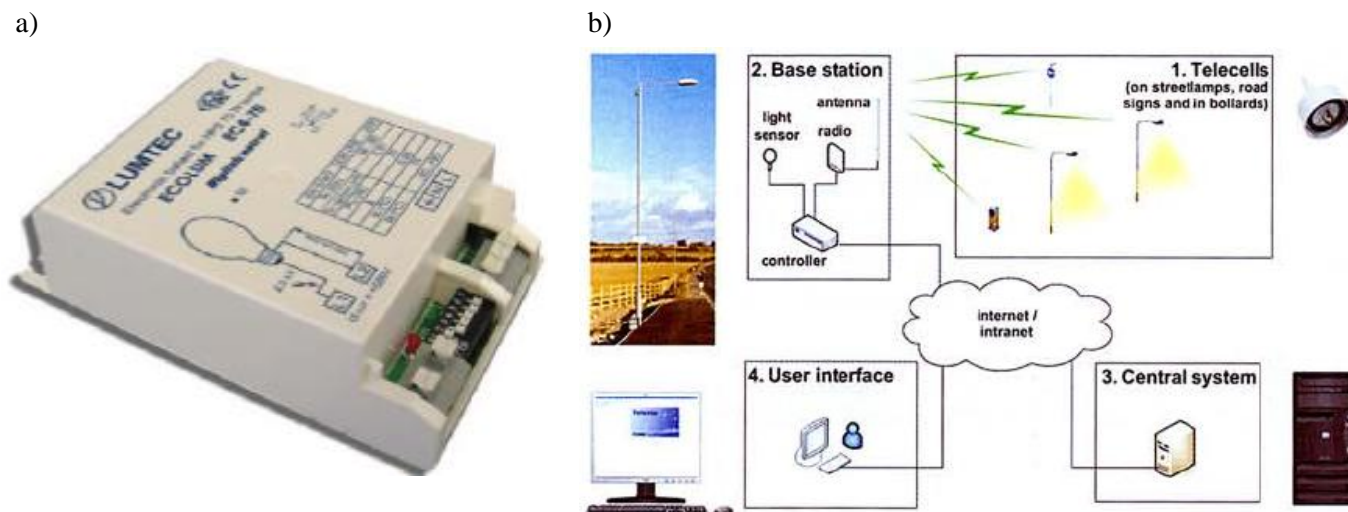


Figura 29 – a) Exemplo de um balastro eletrónico [34]; b) Diagrama esquemático do sistema remoto de monitorização da empresa Telensa [35].

3.4 Luminárias

A eficiência energética na iluminação pública depende do conjunto fonte de luz (lâmpada) /suporte, incluindo a armadura, os componentes eletrónicos e óticos. A luminária é definida como uma unidade completa constituída por uma lâmpada, juntamente com os elementos óticos concebidos para distribuir a luz, com os elementos estruturais para posicionar e proteger a lâmpadas e com os elementos eletrónicos para ligar a lâmpada à fonte de alimentação. Os elementos óticos que compõem a luminária são o refletor, o refrator e a armadura. Estes componentes são um dos fatores essenciais para garantir a eficiência da luminária e o controlo da luz incidente no local pretendido, de forma a garantir o nível adequado de iluminação e evitar a poluição luminosa. Entretanto, outro fator essencial para um sistema de iluminação rodoviário eficiente é a distribuição adequada da luz no espaço em conformidade com as tarefas realizadas nesse mesmo espaço. Assim, a intensidade luminosa emitida pela luminária é diretamente controlada e proporcional de acordo com a largura da via, o espaçamento entre as luminárias, o local geográfico onde vai ser colocada e a altura do poste.

Todas as luminárias podem ser classificadas de acordo com os seus padrões de distribuição lateral e vertical. Diferentes distribuições laterais/transversais (C90-C270) estão disponíveis para diferentes relações entre a largura da estrada e a altura do poste. Diferentes distribuições verticais/longitudinais estão disponíveis para diferentes relações entre o espaçamento lateral dos postes e a altura dos mesmos.

Desta forma, foi definido um sistema de classificação da distribuição da intensidade luminosa emitida por uma luminária com o objetivo de facilitar a seleção das luminárias adequadas para um determinado local: a) Distribuição vertical da luz; b) Distribuição lateral da luz; c) Controlo da distribuição da luz acima da intensidade luminosa máxima.

As distribuições verticais da luz dividem-se em três grupos: Curta (S), Média (M) e Longa (L). Na distribuição Curta, o espaçamento máximo entre luminárias é geralmente inferior a 4,5 vezes a altura do poste. Na distribuição Média, o espaçamento máximo entre luminárias é inferior a 7,5 vezes a altura do poste. Na distribuição Longa, o espaçamento máximo entre luminárias é inferior a 12 vezes a altura do poste.

As distribuições laterais da luz são divididas em dois grupos baseadas na localização da luminária em relação à área a ser iluminada: i) Luminárias no centro ou próximas do centro da área e ii) Luminárias próximas da lateral da área. Cada grupo pode ser subdividido em categorias em relação à largura da área a ser iluminada com a altura do poste.

No caso das luminárias no centro ou próximas do centro da área, segundo a IESNA e a Figura 30, podem ser classificadas segundo as seguintes categorias: Tipo I, Tipo I 4-vias e Tipo V. A principal característica destas categorias é que apresentam uma distribuição da luz simétrica.

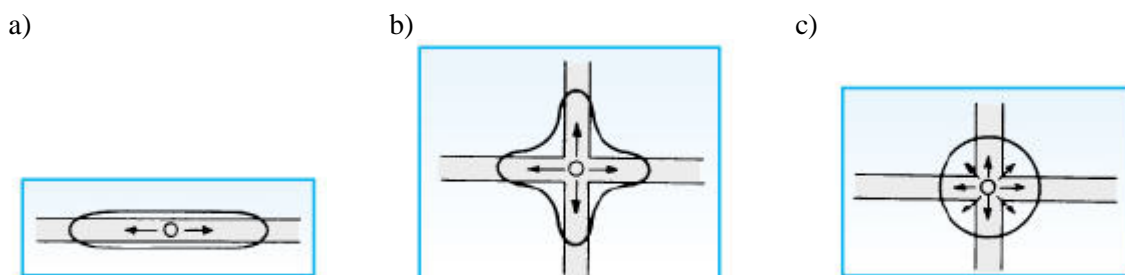


Figura 30 – Diferentes tipos de distribuição laterais da intensidade luminosa para luminárias no centro ou próximas do centro da área: a) Tipo I; b) Tipo I 4-vias e c) Tipo V [8].

As luminárias próximas da lateral da área, segundo a IESNA e a Figura 31, podem ser classificadas segundo as seguintes categorias: Tipo II, Tipo II 4-vias, Tipo III e Tipo IV

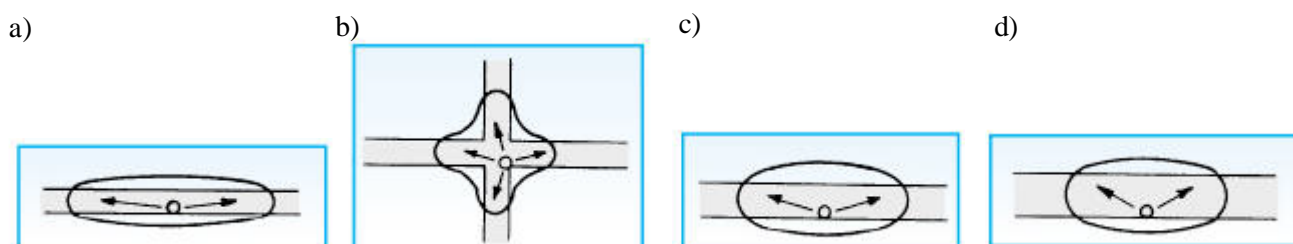


Figura 31 – Diferentes tipos de distribuição laterais da intensidade luminosa para luminárias próximas da lateral da área: a) Tipo II; b) Tipo II 4-vias; c) Tipo III e d) Tipo IV [8].

Por último, e relação ao controlo da distribuição da luz acima da intensidade luminosa máxima, as luminárias são classificadas em três categorias de acordo com o ângulo de emissão da luz [8]:

- **Luminária Full Cutoff** – Neste tipo de distribuição da luz, Figura 32, a intensidade luminosa (candelas) é 0 na horizontal (90°) e ângulos superiores a este. Além disso, acima dos 80° a intensidade luminosa não excede as 100cd/1000 lúmens da lâmpada. Isto aplica-se a todos os ângulos laterais em redor da luminária [8].

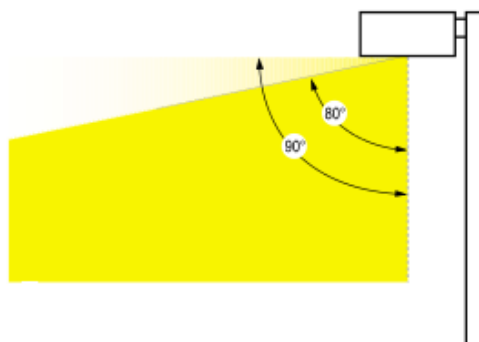


Figura 32 – Exemplo de uma luminária *Full Cutoff* [36].

- **Luminária *Cutoff*** – A emissão da luz é caracterizada por uma elevada redução da intensidade luminosa na zona entre os 80° , 100 cd/1000 lúmens, e a horizontal (90°), 25cd/1000 lúmens. A direção de máxima intensidade pode variar, mas deve ser inferior a 65° . A principal vantagem do sistema, Figura 33, é a redução do encandeamento [8].

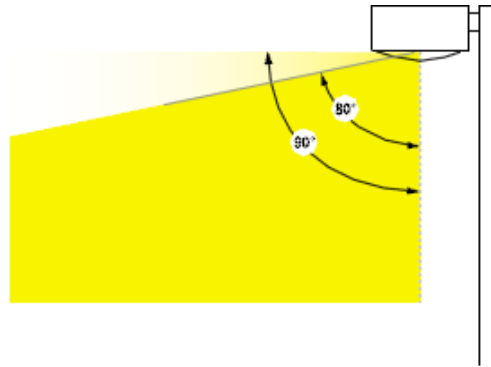


Figura 33 – Exemplo de uma luminária *Cutoff* [36].

- **Luminária *Semi-Cutoff*** – A emissão de luz é caracterizada por não exceder uma intensidade luminosa de 50cd/1000 lúmens acima do ângulo horizontal (90°) e de 200 cd/1000 lúmens acima dos 80° . A direção da máxima intensidade pode variar, mas deve ser inferior a 75° . A principal vantagem deste sistema, Figura 34, é uma maior dispersão de luz no pavimento [8].

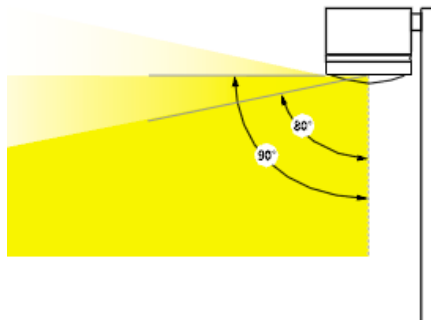


Figura 34 – Exemplo de uma luminária *Semi-Cutoff* [36].

- **Luminária *Non-Cutoff*** – Não há limitação sobre a distribuição de luz e intensidade luminosa em qualquer ângulo. Esta luminária, Figura 35, é permitida quando o efeito diurno provocado pela luminária serve, por exemplo, para iluminação do espaço no global.

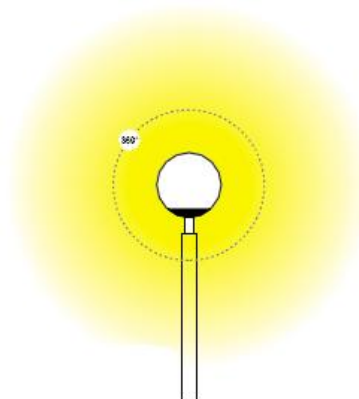


Figura 35 – Exemplo de uma luminária *Non-Cutoff* [36].

4. Caracterização da Rede Nacional de Auto-estradas (RNA), da Auto-estrada A6 e do nó de Évora Poente.

Com a entrada em vigor, em 1998, do Plano Rodoviário Nacional 2000 (PRN 2000) foi definida a rede nacional de auto-estradas (RNA) com uma extensão de 3000km [37]. Segundo o relatório de Monitorização da Rede Rodoviária Nacional (RRN) em 2010, a extensão da rede de auto-estrada ascendia a 2735km, como mostra a Figura 36a), correspondendo a 20% da rede rodoviária nacional em serviço [37]. Entre 2001-2010, a evolução do fluxo automobilístico na Rede Nacional de Auto-estrada, representada pelo indicador de Tráfego Médio Diário Anual (TMDA), verificou um decréscimo de 30 000 veículos/dia para 19 598 veículos/dia. De acordo com o perfil dessa evolução, presente na Figura 36b), prevê-se que com a conclusão da RNA definida no PRN2000 o nível de TMDA estabilize-se nos 20 000 veículos/dia [38].

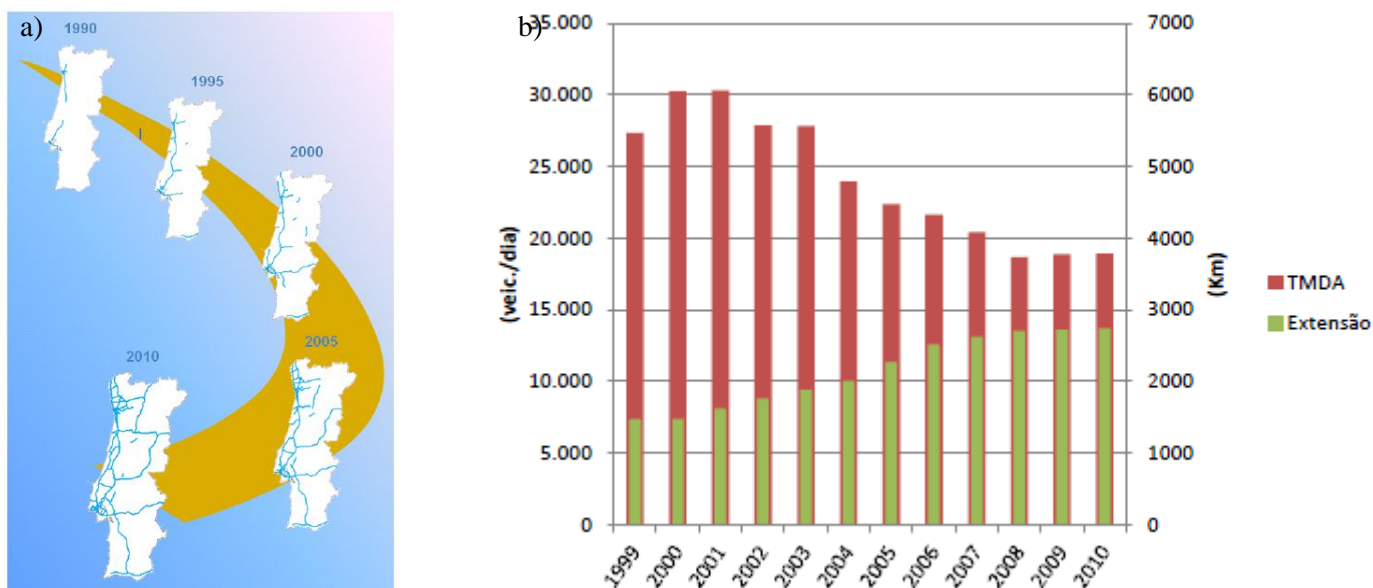


Figura 36 – a) Evolução da rede nacional de auto-estradas (RNA) entre 1990-2010 [37]; b) Evolução do Tráfego Médio Diário Anual (TMDA) e extensão das auto-estradas (AE) [37].

Atualmente, a principal preocupação das concessionárias das auto-estradas é a diminuição de receitas devido à diminuição do fluxo automobilístico. Isto porque as auto-estradas foram dimensionadas para um valor limite de fluxo automobilístico, e sem esse limite alcançado, os serviços prestados estão sobredimensionados. Um exemplo concreto deste sobredimensionamento é o sistema de iluminação, presente apenas nos Nós (*interchanges*) das auto-estradas, apresentar valores fotométricos elevados, como o fluxo luminoso, e número de luminárias superiores ao que é necessário, acarretando um elevado consumo energético. Um exemplo deste sobredimensionamento são as auto-estradas A23 (Beira Interior) e A25 (Beira Litoral/Beira Alta) (auto-estradas afastadas dos centros urbanos e denominadas de auto-estradas interurbanas) que apresentam um número elevado de Nós, logo um grande consumo energético, mas o fato de em 2011 passarem a ter um custo para os condutores (Ex-SCUTS), levou a uma diminuição significativa da circulação automóvel de 36% de 2011 para 2012 na A23 e de 16% de 2011 para 2012 na A25 (Relatório de Tráfego na Rede Nacional de Auto-Estradas, InIR, I.P – 3º trimestre de 2011 e 2012).

A Figura 37 a) mostra que as auto-estradas no interior dos centros urbanos, Lisboa e Porto, apresentam intensidades de tráfego superior a 60 mil carros por dia em 2010 mas, segundo a Figura 37 b), 40% das auto-estradas da RNA apresentam tráfego automobilístico inferior ou igual a 10mil carros por dia. Sabendo que 85% da rede nacional de auto-estrada tem uma intensidade de tráfego médio diário anual (TMDA) inferior a 35 mil veículos por dia, é necessário adaptar os sistemas de iluminação de forma inteligente e inovadora para minimizar o consumo energético e evitar a aplicação de medidas que prejudiquem a qualidade do serviço de iluminação.

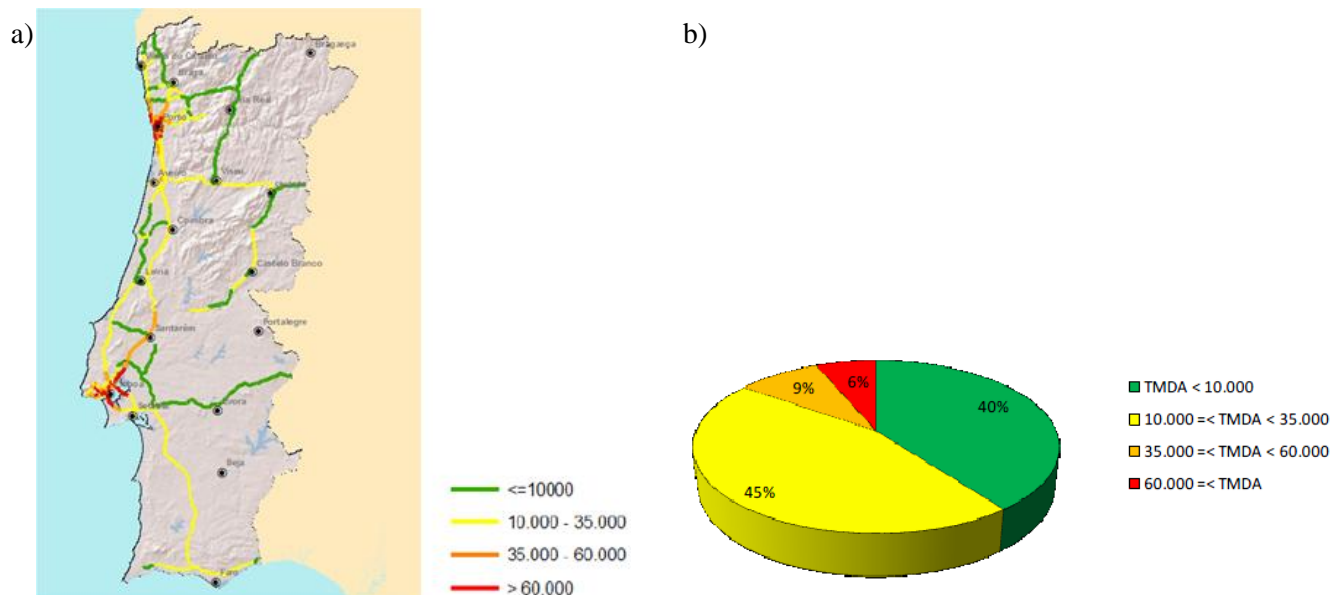


Figura 37 – a) Intensidades de tráfego (TMDA – Tráfego médio diário anual) na rede nacional de auto-estradas (RNA) em Portugal no ano de 2010 [37]; b) Distribuição da RNA por classes de TMDA [38].

A auto-estrada em estudo, A6, cujo traçado se representa na Figura 38, localiza-se no distrito de Évora e Portalegre e faz a ligação entre Marateca e Caia com uma extensão de 157,9km [37].



Figura 38 – Mapa do distrito de Évora [39].

É concessionada pela Brisa e é a principal ligação entre Lisboa e Espanha. O perfil transversal da auto-estrada A6 é de duas faixas de rodagem por duas vias de rodagem/trânsito em cada faixa (2x2)¹¹ [37]. A sua extensão é dividida em treze sublanços, como mostra a Tabela 8, onde apenas os Nós dos sublanços apresentam sistemas de iluminação, como já foi referido na Secção 4.

Tabela 8 – Sublanços da auto-estrada A6 e respetiva extensão de estrada [37].

Sublanços da auto-estrada A6	Extensão (km)
A2/A6/A13 - Vendas Novas	19,50
Vendas Novas - Montemor Oeste	18,70
Montemor Oeste - Montemor Este	5,50
Montemor Este - Évora Poente	15,20
Évora Poente - Évora Nascente	16,00
Évora Nascente - Extremoz	29,80
Extremoz - Borba	12,00
Borba - Elvas	22,10
Elvas Poente – EN246	5,30
EN246 – Elvas Central	2,80
Elvas Central – Elvas Nascente	3,90
Elvas Nascente – Caia	5,20
Caia – Fronteira do Caia	1,90
Auto-estrada A6	157,9

¹¹ O perfil transversal tipo de uma auto-estrada é definido normalmente, em Portugal, primeiramente pelo número de faixas seguido do número de vias existentes em casa faixa.

A auto-estrada A6 faz parte da rede Transeuropeia de Transportes (RTE-T), Figura 39a), e é uma estrada de referência na rede de estradas de tráfego internacional (GETI), Figura 39b).

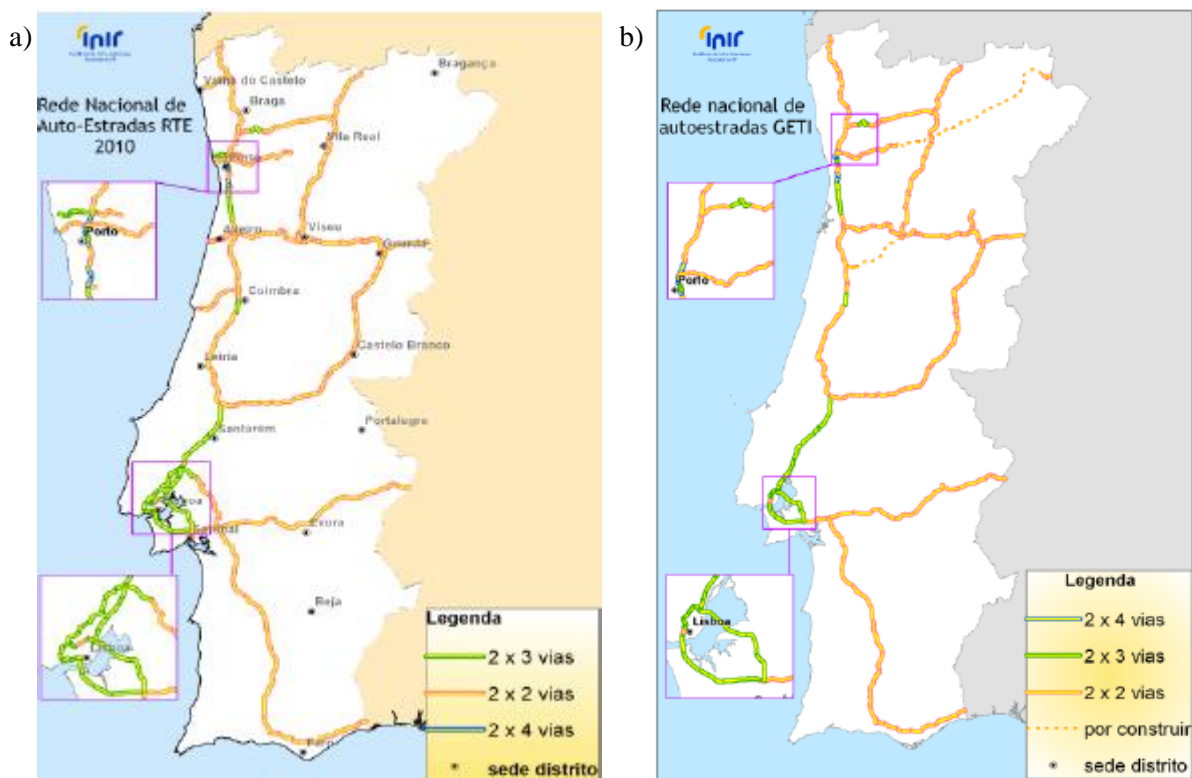


Figura 39 – a) Auto-estradas presentes na rede Transeuropeia de Transportes (RTE-T) em 2010; b) Rede Nacional de Auto-Estradas GETI [37].

No período entre 2008 e 2011, numa abordagem geral, registou-se um decréscimo significativo de 11% no tráfego médio diário mensal, como mostra a Figura 40, devido à diminuição do fluxo automobilístico no primeiro e quarto trimestre, 19% e 16%, como consequência da crise económica, com início em 2008, e aumento do valor a pagar nas portagens. No terceiro trimestre a variação é mínima, devido a corresponder a período de férias com elevada afluência dos emigrantes à sua terra natal.

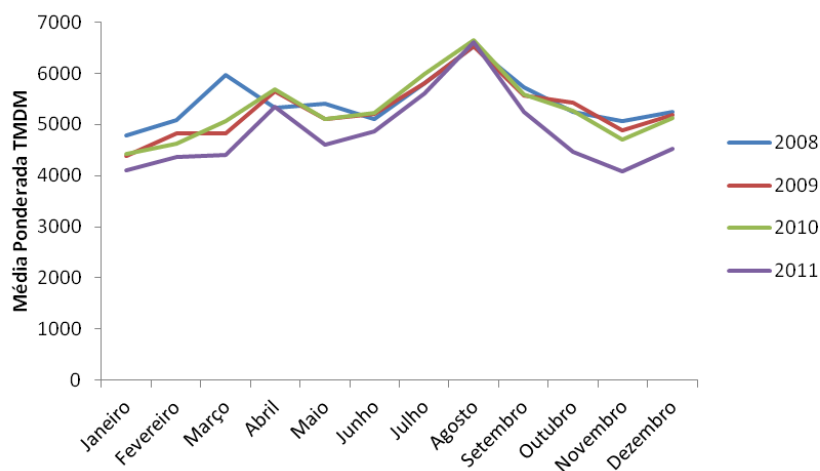


Figura 40 – Evolução do Tráfego médio diário mensal (TMDM) na auto-estrada A6 entre o período de 2008 – 2011 (Dados fornecidos pelo InIR, I.P.).

Em 2011 o consumo de energia ativa da auto-estrada A6 foi de aproximadamente 2GWh. A Figura 41 mostra que apenas cinco nós (*interchanges*) apresentam consumo médio mensal superior à média, que é cerca de 13,8 MWh. Contudo, segundo a barra do desvio padrão percebeu-se que os mesmos nós apresentam variações significativas ao longo do ano. Este facto deve-se à diferença do tempo de funcionamento do sistema de iluminação, que é de 13h (18h – 7h) no primeiro e quarto trimestre (Janeiro, Fevereiro, Março, Outubro, Novembro, Dezembro) e de 9h (21h – 6h) no segundo e terceiro trimestre (Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro) totalizando um valor anual horário de funcionamento de 4013h. O elevado consumo de energia reativa indutiva nos nós pode dever-se ao facto de as luminárias não integrarem o condensador de compensação da energia reativa consumida pelo balastro ferromagnético no interior da sua armadura¹². O elevado valor de energia reativa capacitiva só pode ser justificável com uma análise pormenorizada das cargas instaladas na rede elétrica daquele local.

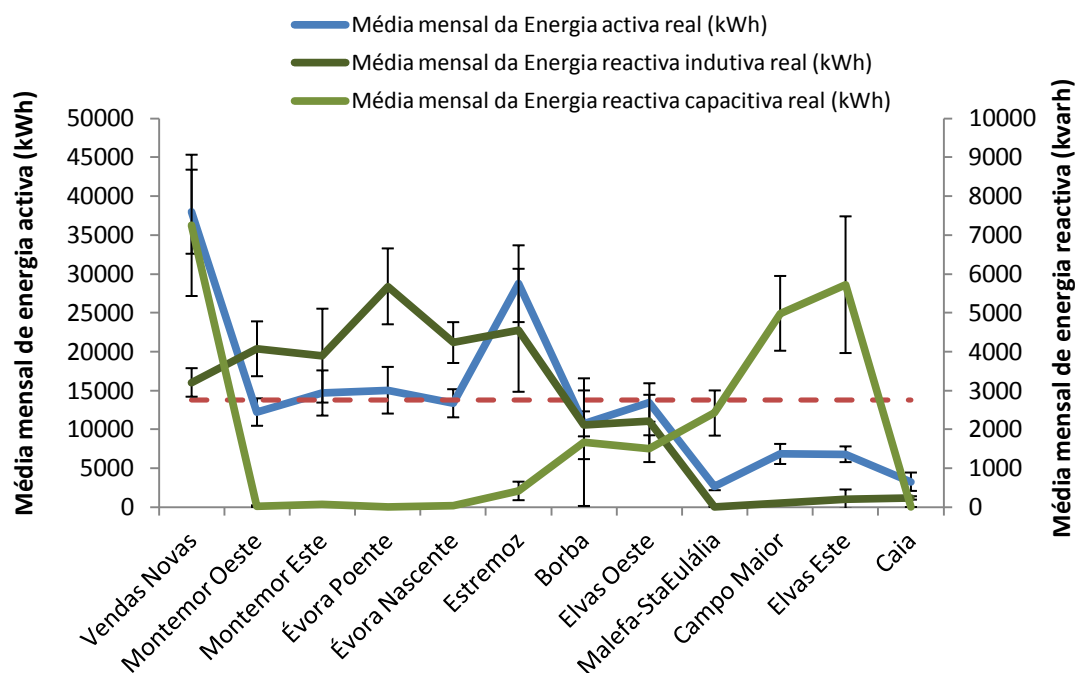


Figura 41 – Consumo eléctrico médio mensal dos Nós da auto-estrada A6 em 2011 (Dados disponibilizados pela BRISA).

A seleção do nó de Évora Poente deve-se ao tema da eficiência energética nas auto-estradas ir ao encontro do caminho traçado pela cidade de Évora em tornar-se uma das cidades mais inteligentes do mundo. Como a auto-estrada foi dimensionada para um número de veículos em circulação superior ao atual, este fator indica que, atualmente, a auto-estrada está sobredimensionada em relação aos serviços prestados. Portanto, é relevante realizar um estudo que foque os fatores com maior importância no funcionamento de uma auto-estrada: *i*) otimização dos serviços; *ii*) cumprimento das normas europeias; *iii*) eficiência energética; *iv*) segurança; *v*) ciclo de vida do serviço.

Como foi mencionado na Secção 4 os Nós das auto-estradas são os principais responsáveis pelo elevado consumo de recursos energéticos, daí estudar-se apenas o nó de Évora Poente como referência.

O nó de Évora Poente, presente na Figura 42a) e ilustrado em imagem satélite na Figura 42b), está situado ao quilómetro 59 da auto-estrada A6 e faz parte a Oeste do sublanço Montemor-o-Novo

¹² Este condensador é com alguma frequência indevidamente desligado pelos funcionários durante as operações de manutenção por comodidade, procurando evitar a exposição a descargas eléctricas.

Nascente - Évora Poente (extensão de 15,2km) e a Este do sublanço Évora Poente – Évora Nascente (extensão de 16km).

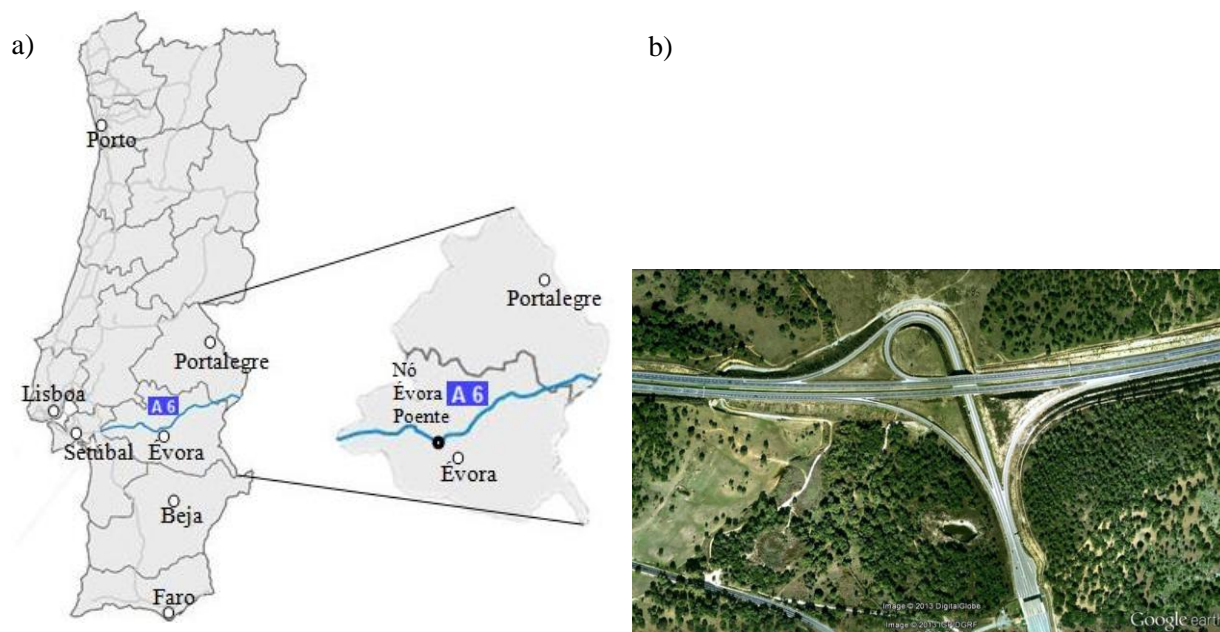


Figura 42 – a) Mapa de Portugal com respectiva rede nacional de auto-estradas (RNA). A linha azul corresponde à auto-estrada A6 e o ponto preto ao nó de Évora Poente em estudo; b) Imagem satélite do nó de Évora Poente da auto-estrada A6. Fonte: GoogleEarth®

O classe de pavimento da auto-estrada, segundo a literatura [40] e a Tabela 9, é R3 com um coeficiente médio de luminância, q_0 , de $0,07 \text{ cd/m}^2/\text{lux}$ [40]. A superfície da estrada é em asfalto com agregados escuros e apresenta uma textura áspera após alguns meses de uso, típico de pavimento de auto-estrada. O modo de reflectância é ligeiramente polido [40].

Tabela 9 – Sistema de classificação da estrada com pavimento em diferentes tipos de asfalto (R1, R2, R3, R4).

Tipo de classificação de pavimento	Coeficiente de luminância médio normalizado (q_0) ($\text{cd.m}^{-2}.\text{lux}^{-1}$) [40]	Modo de reflectância [40]
R1	0,10	Maioritariamente difuso
R2	0,07	Misto (Difuso e Polido)
R3	0,07	Ligeiramente polido
R4	0,08	Maioritariamente polido

O tráfego horário mensal no Nó de Évora Poente é um indicador importante para determinar a classe de iluminação da estrada em estudo e a forma como um sistema de redução de fluxo pode intervir como ferramenta de eficiência energética. A Figura 43a) mostra o número de veículos totais em cada hora, na saída e entrada da portagem, durante o período do mês de Abril de 2011 e é perceptível que o tráfego é muito baixo durante o período noturno, surgindo a oportunidade de desenvolver um plano estratégico para redução do fluxo luminoso para valores mínimos adequados ao tráfego existente. Este plano estratégico evita que as concessionárias simplesmente apaguem os pontos de luz, pondo em causa a qualidade da visão humana, conforto e segurança dos automobilistas durante a condução noturna, tarefa bastante exigente e complexa. A Figura 43b) permite perceber de uma forma mais quantitativa o número de veículos por dia, o que permite escolher na norma EN13201, abordado na Secção 5.1.1, qual a categoria de tráfego em que se insere a estrada em estudo. O tráfego médio diário no mês de Abril (TMDM) é de 1345 veículos, muito inferior aos 15 000 veículos/dia imposto pela norma EN13201 como limite mínimo para a determinar a respetiva classe de iluminação.

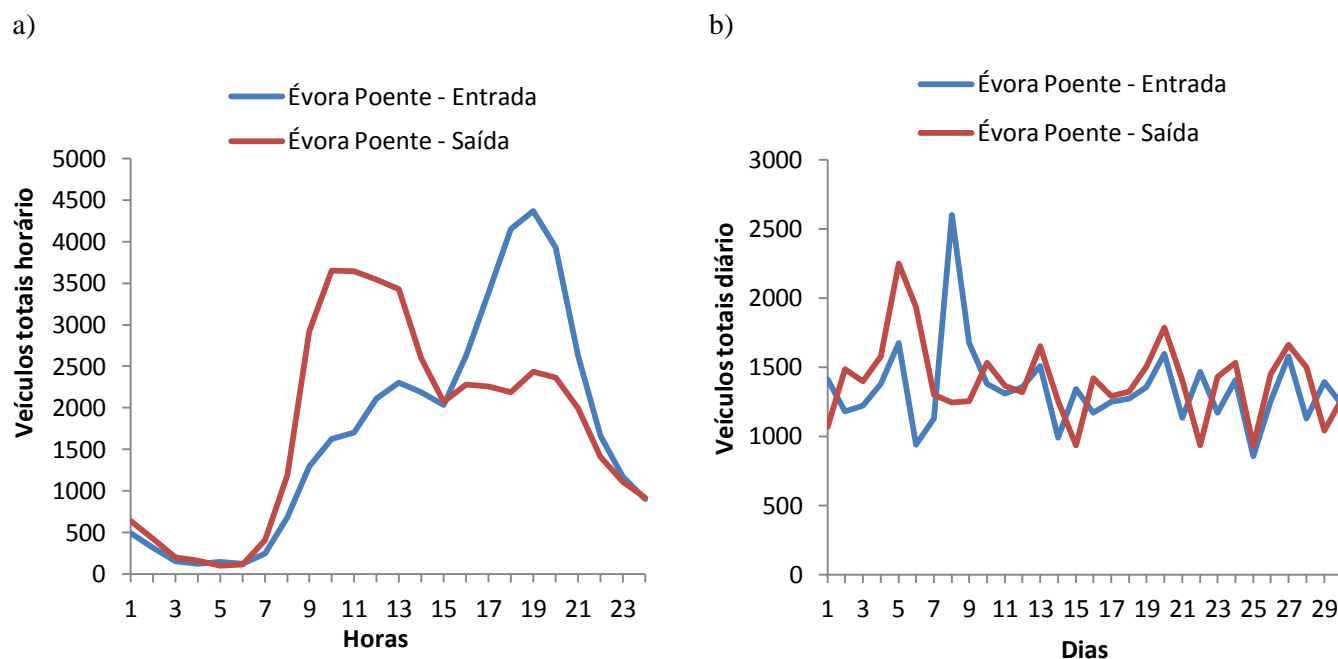


Figura 43 – a) Número total de veículos horário, a entrar e a sair da Portagem de Évora Poente, durante o mês de Abril de 2011. b) Número total de veículos diário a entrar e a sair da Portagem de Évora Poente, durante o mês de Abril de 2011. (Dados disponibilizados pela BRISA)

Na Figura 44 é possível observar que a variação do tráfego médio diário mensal de 2008 para 2011, nos sublanços de Montemor Este – Évora Poente e Évora Poente – Évora Nascente, continua bastante abaixo do limite de 15 000 veículos/dia referido anteriormente.

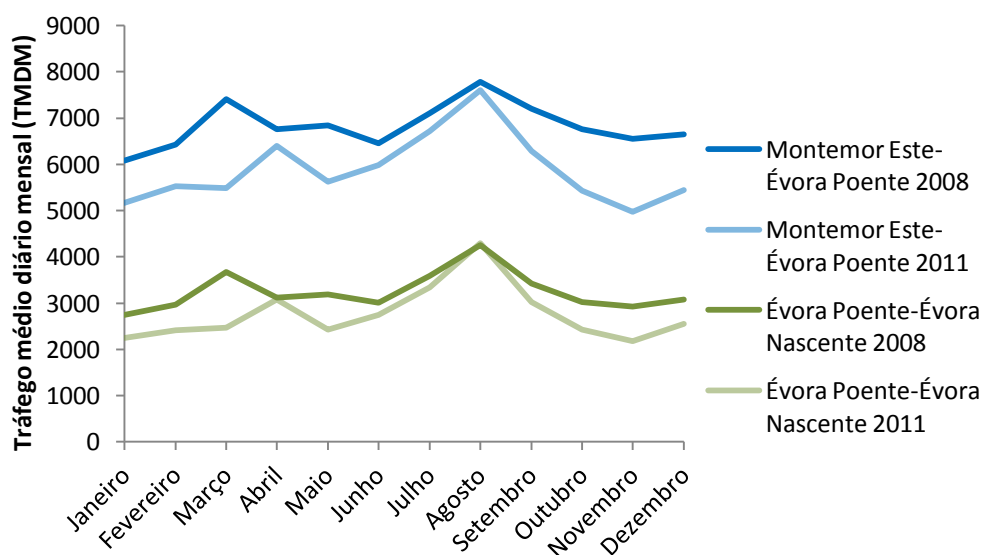


Figura 44 – Comparação entre os tráfegos médios diários mensais dos sublanços Montemor Oeste – Évora Poente e Évora Poente – Évora Nascente, em 2008 e 2011 (Dados fornecidos pelo INIR, I.P.).

4.1 Descrição do caso de estudo

O sistema de iluminação rodoviário do Nó de Évora Poente tal como foi inicialmente projetado é constituído por 67 luminárias em que 28 apresentam uma coluna de iluminação de 9m com potência de 150W, 36 uma coluna de iluminação de 12m com potência de 250W e 3 projetores com potência de 250W. As lâmpadas são de vapor de sódio alta pressão (VSAP). Este sistema sofreu várias reestruturações desde o início do seu funcionamento, devido a fatores como a diminuição do fluxo automobilístico, medidas de redução da despesa energética, evolução da tecnologia do sector da iluminação e aumento dos custos de manutenção e operação. Assim, atualmente, o sistema de iluminação apresenta um conjunto de 10 luminárias de 150W, com 9 metros de altura, 25 luminárias de 250W, com 12 metros de altura, e 1 projetor de 250W em funcionamento. A Figura 45 apresenta a distribuição das luminárias geograficamente no nó da auto-estrada, em que a cor amarela e cinzenta indica se a luminária está ligada ou desligada, respetivamente. As circunferências representam luminárias de 250W, os círculos luminárias de 150W, e os quadrados, localizados debaixo da estrada (ponte), são projetores de 250W. Os retângulos a vermelho representam os 2 locais onde foram efetuadas medições, A, B, em que cada um representa um conjunto diferente de condições, sobretudo no que diz respeito à distância entre as armaduras VSAP de 250W e ao perfil geométrico da estrada, como mostra a Tabela 10 e a Figura 46.



Figura 45 – Distribuição das luminárias geograficamente no Nó de Évora Poente. As luminárias estão representadas por tipo/potência (esfera - 250W, círculo - 150W e quadrado - projetor 250W) e pelo estado de funcionamento (amarelo-ligado, cinzento-desligado). Fonte: Concessionária BRISA

Tabela 10 – Descrição das 2 áreas onde foram efetuadas medições.

Local	Perfil da estrada	Luminária existente	Distância entre luminárias (m)
A	(3x2)	VSAP 250W	45
B	(1x2)	VSAP 250W	90



Figura 46 – Fotografias dos Locais A e B em estudo tiradas durante as medições na noite de 6/11/2012

Toda a iluminação e outros equipamentos consumidores presentes na área envolvente da praça de Portagem e ligação ao Nó da EN114 não foram considerados para este estudo, no entanto estão presentes nos dados de consumo estimado porque só existe um quadro trifásico. As luminárias foram instaladas em 1998 e o sistema de rede elétrica trifásica tem associado um transformador de 100kVA.

A descrição das características das luminárias instaladas e em funcionamento apresenta-se resumido na Tabela 11. O Anexo III – Curvas de distribuição da intensidade luminosa (cd) da luminária HADASA M250A/H e Philips SGS253 GB apresenta as curvas de distribuição da intensidade luminosa da luminária em estudo fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 11 – Informação sobre o sistema de iluminação, lâmpada e luminária, presente no Nó de Évora Poente.

	<i>Master Son-T PIA Hg-Free – Vapor de Sódio Alta Pressão (VSAP) [41]</i>	<i>Master Son-T PIA Hg-Free – Vapor de Sódio Alta Pressão (VSAP) [41]</i>
Lâmpada		
Potência da lâmpada (W)	150	250
Temperatura da cor (K)	2150	2150
Lumens saída (lm)	15000	28000
Eficácia Luminosa (lm/W)	100	110
Tempo de vida da lâmpada, para 10% de falhas (h)	19000	19000
Fator de sobrevivência da lâmpada (FSL) após 12000h	0,98	0,98
Fator de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada (FMLL) 12000h	0,95	0,95
Índice de reprodução de cor (IRC)	25	25
Tensão da lâmpada (V)	98	100
Corrente da lâmpada (A) (BEM)	1,8	3
Luminária		
Tipo de luminárias	Luminária fechada de montagem na horizontal. <i>Semi-cutoff</i> Projetores	
Número de luminárias instaladas	28	36
Número de projetores instalados	-----	3
Número de luminárias + projetores ligados	10	25 + 1
Eficiência ótica da luminária (%)	80,6	
Perdas do balastro ferromagnético (W)	20	27
Tipo de distribuição da luz	Tipo II - <i>Short</i>	
Classificação da armadura	Hadasa M250 A/H VST	
Índice de Proteção	IP65	
Refrator/Difusor	Vidro borosilicatado prismático	
Fator de manutenção da luminária (FML) Baixa Poluição 12000h	0,82	
Controlo de iluminação	Não	
Altura da luminária (m)	9	12
Comprimento do braço extensor (m)	1	
Inclinação (°)	5°	

Segundo dados disponibilizados pela BRISA, em relação ao consumo de energia elétrica, o nó de Évora Poente tem um consumo anual de energia ativa de aproximadamente 180MWh e um consumo anual de energia reativa indutiva de 68MVarh (dados relativos a 2011, inclui o nó de Évora EN114 e Portagem), Figura 47. Este consumo anual corresponde, respectivamente, a 9,2% e a 18,6% de todo o consumo de energia ativa e reativa indutiva da auto-estrada A6.

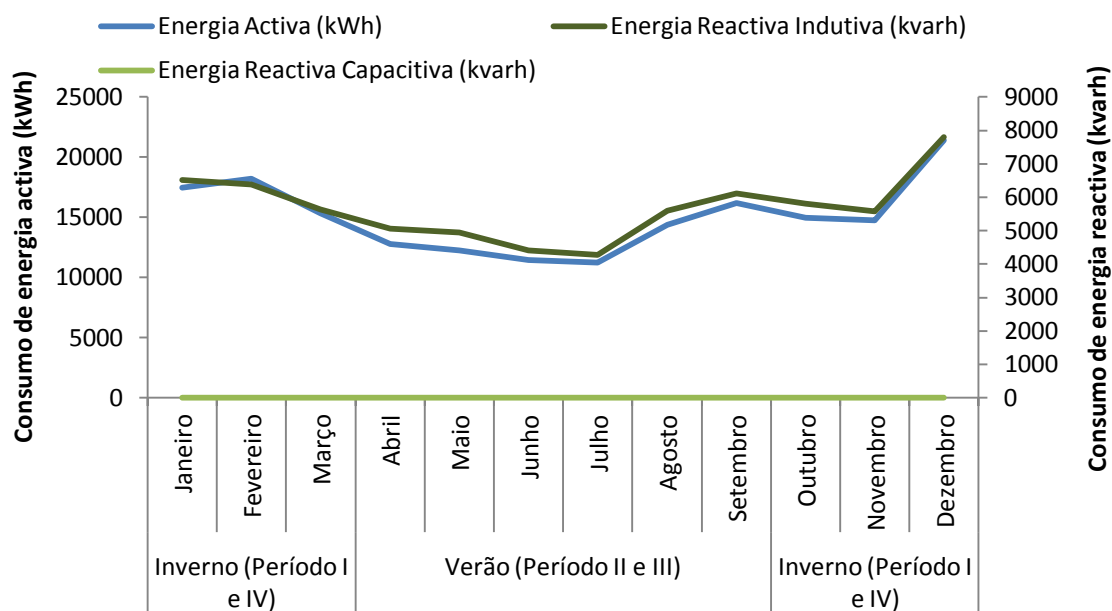


Figura 47 – Variação anual do consumo total mensal de energia ativa, reativa (indutiva e capacitiva) no nó de Évora Poente em 2011

5. Metodologia aplicada ao caso de estudo: Sistema de iluminação do Nó de Évora Poente

A metodologia a ser aplicada no desenvolvimento das três propostas em estudo, avaliação do desempenho do sistema de iluminação atual, remodelação do sistema de iluminação atual e dimensionamento de um novo sistema de iluminação mais eficiente, tem como objetivo reunir as informações necessárias para que seja possível comparar os consumos energéticos e custos económicos dos três cenários/propostas e discutir os benefícios que a concessionária pode obter.

Para que seja possível dimensionar um novo sistema de iluminação para o local em estudo ou mesmo uma remodelação, foi necessário fazer uma avaliação pormenorizada do desempenho do sistema de iluminação atualmente instalado.

Inicialmente fez-se um levantamento das características do Nó de Évora Poente, Secção 4, que permitiram reunir um conjunto de informações sobre os fatores presentes (Secção 2.3), que influenciam a seleção da classe de iluminação. A classe de iluminação foi selecionada de acordo com a norma EN13201-1 e EN13201-2 sendo este processo descrito na Secção 5.1.1.

Através dos dados obtidos no levantamento inicial, sobre as características do sistema de iluminação, em termos de número de luminárias e posicionamento no espaço, potência instalada e tecnologia usada foi possível aplicar a norma EN13201-3 e EN13201-4, apresentada na Secção 2.3, para medição das quantidades fotométricas no local em estudo. A Secção 5.2 apresenta uma descrição pormenorizada de todo o processo de medição, que se baseou na recolha de informações relevantes que permitissem completar todos os requisitos apresentados pelo relatório típico recomendado pela norma EN13201-4.

Para tornar a análise do desempenho do sistema de iluminação mais completa, recorreu-se a um conjunto de relações, presentes na Secção 5.3, que permitem determinar a eficácia (lm/W) do sistema de iluminação instalado, tendo em conta a eficiência ótica, eficiência do balastro e a eficácia da lâmpada.

Para avaliar o estado de operacionalização do sistema de iluminação instalado, comparou-se os valores fotométricos medidos com os valores fotométricos estimados pelo *software* DIALux. Este *software* foi usado posteriormente para a simulação das propostas de remodelação do sistema de iluminação e de um novo sistema de iluminação eficiente, de forma a verificar se as tecnologias consideradas fornecem as quantidades fotométricas requeridas pela norma EN13201.

Como o sistema de iluminação em funcionamento e as propostas estudadas tem um custo associado, recorreu-se ao Anexo A da recomendação CIE 115:2010, abordado na Secção 2.3.3, de forma a calcular o custo do ciclo de vida de cada sistema de iluminação em estudo.

A Figura 48 apresenta resumidamente o plano de ação, metodologia e métodos, utilizado para o desenvolvimento do caso de estudo.

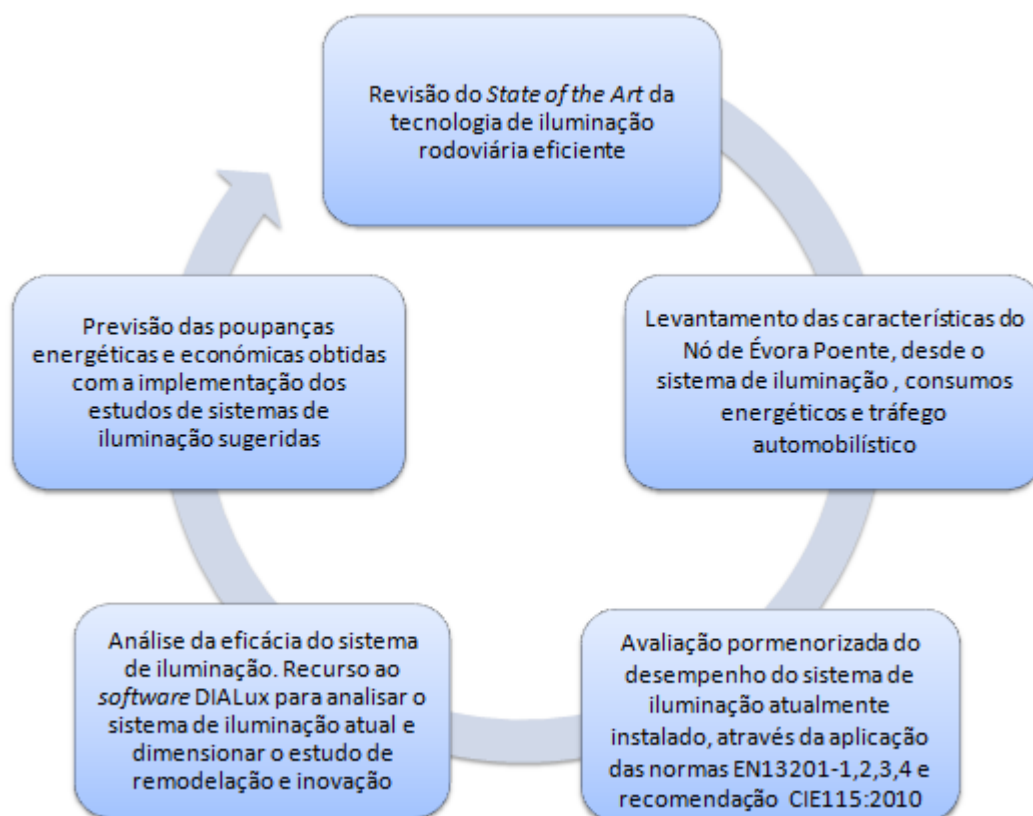


Figura 48 – Resumo da metodologia e métodos adotados para o estudo da implementação de um sistema de iluminação eficiente.

5.1 Aplicação da norma EN13201 *Road lighting*

5.1.1 Determinação da classe de iluminação segundo a norma EN 13201-1 e EN13201-2

O primeiro passo estabelecido pela norma EN 13201-1 [23] é o de definir a situação de iluminação do troço de auto-estrada, com base nos parâmetros da velocidade típica dos utilizadores principais e o tipo de utilizadores presentes na mesma área relevante, que será definida na Secção 5.2. A Tabela 12 foi adaptada da Secção 2.3 e apenas mostra a situação de iluminação selecionada para a área relevante em estudo.

Tabela 12 – Situação de iluminação para a área relevante de auto-estrada do nó de Évora Poente

Velocidade típica dos utilizadores principais (km/h)	Tipos de utilizadores na mesma área relevante	Situação de iluminação
	Utilizadores principais	
> 60	Tráfego motorizado	A1

As recomendações de iluminação, para uma situação de iluminação A1, dependem da geometria da área relevante, do tráfego e das influências ambientais e externas. A área relevante do troço em estudo, para a situação de iluminação A1, é definida separadamente em vias de trânsito e vias de emergência. Visto o troço em estudo ser do tipo auto-estrada, considerou-se apenas a área total das vias de trânsito como área relevante.

A Tabela 13 obteve-se segundo a Tabela 2, através das características da área relevante e da situação de iluminação A1. O clima do distrito de Évora, segundo a classificação de *Kroppen*, é um clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (C_{sa}), com uma precipitação média anual de aproximadamente 700mm. Como em 2011 apenas ocorreram 72 dias de chuva [42], considerou-se que o principal tipo de clima do distrito de Évora é Seco.

Tabela 13 – Intervalo recomendado de classes de iluminação para o troço de auto-estrada
Nó Évora Poente

Tipo principal de clima	Separação de faixas de rodagem	Tipo de cruzamentos	Volume de tráfego de veículos por dia (nº veículos/dia)		
		Cruzamentos de autoestradas (<i>interchanges</i>) (distância entre acessos, km)	<15000		
			←	0	→
Seco	Sim	> 3	ME5	ME4a	ME3a

Determinado o intervalo das classes de iluminação, através da Tabela 14 adaptada da Tabela 3 obteve-se o ícone que define a classe de iluminação da área relevante, neste caso o troço de auto-estrada do nó de Évora Poente.

Tabela 14 – Seleção recomendada do ícone segundo características da área relevante

Área conflito	Complexidade do campo visual	Dificuldade da tarefa de condução	Luminosidade ambiente		
Sim			Baixo (arredor campestre)	Médio (arredor urbano)	Alto (arredor do centro da cidade)
			→		

Desta forma, a classe de iluminação recomendada para o troço do Nó de Évora Poente é a **ME3a**.

Para saber os valores fotométricos requeridos pela classe de iluminação ME3a, recorreu-se à norma EN13201-2 [10]. Como o troço analisado faz parte da classe ME, utilizada apenas por veículos motorizados com velocidade elevada ou média de circulação, recorreu-se à Tabela 4.

Assim, a Tabela 15 adaptada do Tabela 4 representa as exigências fotométricas para a classe de iluminação ME3a.

Tabela 15 – Valores fotométricos requerido pela classe de iluminação ME.

Classe	Luminância da superfície da estrada da faixa de rodagem para condições de superfície de estrada seca			Encadeamento perturbador	Iluminação envolvente
	L_{med} mínimo (cd/m ²)	U_0 mínimo	U_L mínimo	TI máximo (%)	SR mínimo
ME3a	1	0,4	0,7	15	0,5

A norma EN13201-2 apresenta limitações na exigência do cumprimento dos valores fotométricos, porque fatores como o índice de reprodução de cor (IRC), temperatura de cor (TC) e eficácia da iluminação carecem de normalização visto que são importantes para atingir uma maior eficiência energética dos sistemas de iluminação.

A caracterização do troço do nó de Évora Poente, Figura 49, segundo as normas EN 13201-1 [23] e EN13201-2 [10] permitiu definir um conjunto de requisitos fotométricos com o objetivo de corresponder às necessidades visuais dos utilizadores, durante o período de condução, da área de auto-estrada em estudo.

5.2 Análise das quantidades fotométricas medidas *in situ*

Para avaliação dos parâmetros fotométricos do sistema de iluminação, segundo a norma EN13201 presente na Secção 5, analisou-se as estradas segundo a sua geometria, medindo a largura das vias de trânsito, a distância das luminárias à via de trânsito, largura das bermas do separador central e lateral e interdistância entre luminárias. Assim, como mostra a Figura 49a) e Figura 49b), os elementos referidos permitiram determinar a área relevante de estudo para o Local A de 45 m x 12,05m e para o Local B de 90 m x 9,92 m. As áreas relevantes incluem a largura dos traços contínuos de 0,2m. A distância do poste de iluminação à berma é de 1,1m.

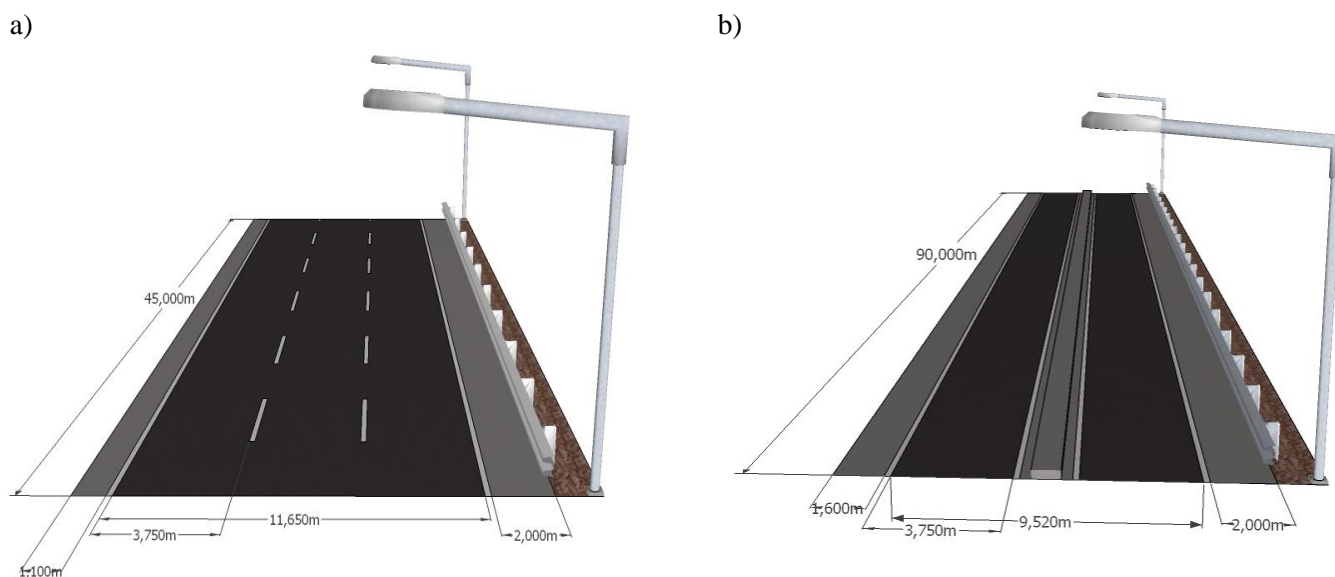


Figura 49 – Área relevante do troço de auto-estrada do nó de Évora Poente: a) Local A e b) Local B

O processo de medição *in situ*, foi realizado segundo a norma EN13201-4, durante o período noturno do dia 6 de Novembro de 2012 para os Locais A e B. Na medição dos valores de iluminância (lux) sobre a superfície da estrada, usou-se um luxímetro de modelo LDR-208. Para o Local A, mediram-se 10 pontos na longitudinal, numa distância de 45m entre luminárias com lâmpadas de vapor de sódio alta pressão (VSAP) de 250 W instaladas a Julho de 2007, e 4 pontos na transversal, numa largura de aproximadamente 12m de faixa de rodagem, como mostra a Figura 50a). Para o Local B, mediram-se 16 pontos na longitudinal, numa distância de 90m entre luminárias com lâmpadas de vapor de sódio alta pressão (VSAP) de 250 W instaladas a Julho de 2007, e 3 pontos na transversal, numa largura de aproximadamente 10m de faixa de rodagem, como mostra a Figura 50b)

Usou-se uma fita métrica de 5metros para medir a distância entre os pontos de medição para que posteriormente fosse possível o desenho da malha. Durante o período de medição, mediram-se os parâmetros da rede elétrica trifásica local: a corrente (A), a tensão (V), a potência ativa (W), reativa (var) e aparente (VA), utilizando um analisador de potência de modelo C.A 8332. O objetivo foi avaliar o comportamento da rede de fornecimento de energia elétrica local com as cargas (luminárias) em funcionamento para se avaliar se as condições de funcionamento da rede elétrica durante as medições são estáveis e correspondem às condições normais de utilização.

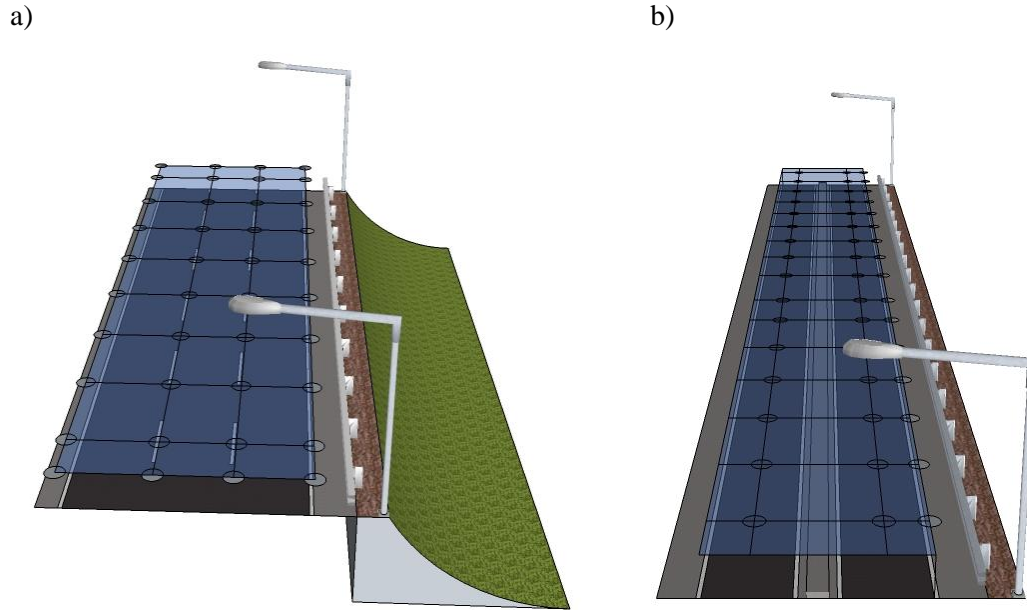


Figura 50 – Distribuição dos pontos de iluminação (circunferências) medidos na malha (a azul) descrita na superfície da estrada da: a) Local A; b) Local B

O Anexo II – Relatório da medição no dia 6/11/2012 segundo o formato do relatório teste do Anexo A da norma EN13201-4 apresenta um relatório detalhado, sugerido pela norma EN13201-4, onde são referidos todos os elementos necessários para avaliação do sistema presente de iluminação.

No cálculo de valores de luminância, usou-se o processo de conversão de lux para cd/m^2 tendo em conta apenas o tipo de estrada (R3 com um coeficiente médio de luminância, $q_0 = 0,07 \text{ cd/m}^2/\text{lux}$), obtendo um valor estático. Este processo é uma limitação ao estudo de desenvolvimento e otimização da iluminação rodoviária, porque os níveis de luminância na superfície da estrada são dinâmicos e dependem de fatores como as condições do clima, contribuição da luz dos faróis, propriedades de refletância das superfícies da estrada e observador.

5.3 Análise da eficácia do sistema de iluminação

Como o aumento do custo de operação e manutenção dos sistemas de iluminação a eficácia da luminária (lm/W) passa a ser um fator importante no seu desempenho ótimo [29, 43]. Assim, a eficácia de uma luminária ($\eta_{\text{luminária}}$) no fornecimento de um fluxo luminoso (lumens) a uma determinada área pode ser expresso pela fórmula (26), com dimensões de lúmen por Watt (lm/W).

$$\eta_{\text{luminária}} = \eta_{\text{balastro}} \times \eta_{\text{lâmpada}} \times \eta_{\text{óptica}} \quad (26)$$

onde, η_{balastro} (%) representa a eficiência com que o balastro entrega a energia da rede elétrica à lâmpada¹³, $\eta_{\text{lâmpada}}$ (lm/W) representa a eficácia da lâmpada na conversão da energia elétrica (W) em fluxo luminoso (lm) e $\eta_{\text{óptica}}$ (%) representa a eficiência ótica da luminária. Referente à lâmpada, a eficácia determina-se segundo a fórmula (27):

$$\eta_{\text{lâmpada}} = \frac{\int V(\lambda) \times S(\lambda)}{W_{\text{lâmpada}}} = \frac{F}{W_{\text{visível}}} \times \frac{W_{\text{visível}}}{W_{\text{lâmpada}}} = \eta_{\text{visível}} \times \eta_{\text{descarga}} \quad (27)$$

Onde, $V(\lambda)$ é a função de resposta fotópica (lm/W) presente na Figura 12b) e $S(\lambda)$ é a distribuição do espectro de potência emitida (W/nm) presente na Figura 54. Os limites de integração considerados são

¹³ Sendo o balastro utilizado para limitar a corrente numa lâmpada de descarga, é inevitável que nele ocorra alguma perda de energia.

os limites do comprimento de onda da região do visível 360 – 800nm (Figura 12b))¹⁴, sendo a expressão da integração a ser representada por lúmens fotópicos, F (lm).

Desta forma, a eficácia da lâmpada é fortemente influenciada pela temperatura de cor que se pretende. $W_{\text{visível}}$ é a integração da potência emitida na região do visível, 360 até 800 nm. $\eta_{\text{visível}}$ (lm fotópico/W) é a eficácia máxima da lâmpada na região do visível, sendo o limite para atingir a sua respetiva cor¹⁵. η_{descarga} (%) é a percentagem de conversão da potência elétrica consumida pela lâmpada em luz visível.

Estes fatores são de extrema importância na comparação da tecnologia mais adequada para um sistema de iluminação rodoviário.

¹⁴ Porque a função de resposta fotópica $V(\lambda)$ é 0 fora da região do visível, 360 – 800nm

¹⁵ Uma fonte incandescente na curva de corpo negro com uma *correlated color temperature* de 3000K tem o mesmo limite de eficácia luminosa no visível que uma lâmpada de descarga aos 3000 K com a mesma cromaticidade. A diferença está em como cada equipamento converte a potência elétrica em potência radiativa visível.

6. Resultados

6.1 Desempenho do sistema de Iluminação Atual

A norma EN13201-4 sugere que se faça medições, para integrar no relatório final, de valores característicos do fornecimento de eletricidade durante o processo de medição de valores fotométricos na auto-estrada. Estas medições são importantes porque num estudo de um sistema de iluminação é essencial avaliar primeiro a estabilidade da rede elétrica no local uma vez que, quando equipadas com balastros ferromagnéticos as lâmpadas de vapor de sódio são sensíveis a variações dos parâmetros elétricos, como a tensão e a corrente. Contudo, estas medições permitiram também avaliar e caracterizar o consumo de energia ativa e reativa e variação do fator de potência no ponto em estudo.

Assim, com recurso ao período de transição, diurno/noturno, avaliou-se o impacto do sistema de iluminação ligado e desligado e mediram-se os parâmetros elétricos fundamentais para avaliar a estabilidade da rede trifásica. A Figura 51 mostra a variação da corrente e da tensão com a entrada em funcionamento às 17:55:00 do sistema de iluminação. Neste mesmo período de transição avaliou-se a potência ativa, reativa e fator de potência, como mostra a Figura 52 e Figura 53 respetivamente. Todas as medições foram realizadas no quadro trifásico geral, sendo estes valores os totais do Nó de Évora Poente, que inclui a fração da Portagem, do Nó da nacional EN114 e Nó da auto-estrada A6.

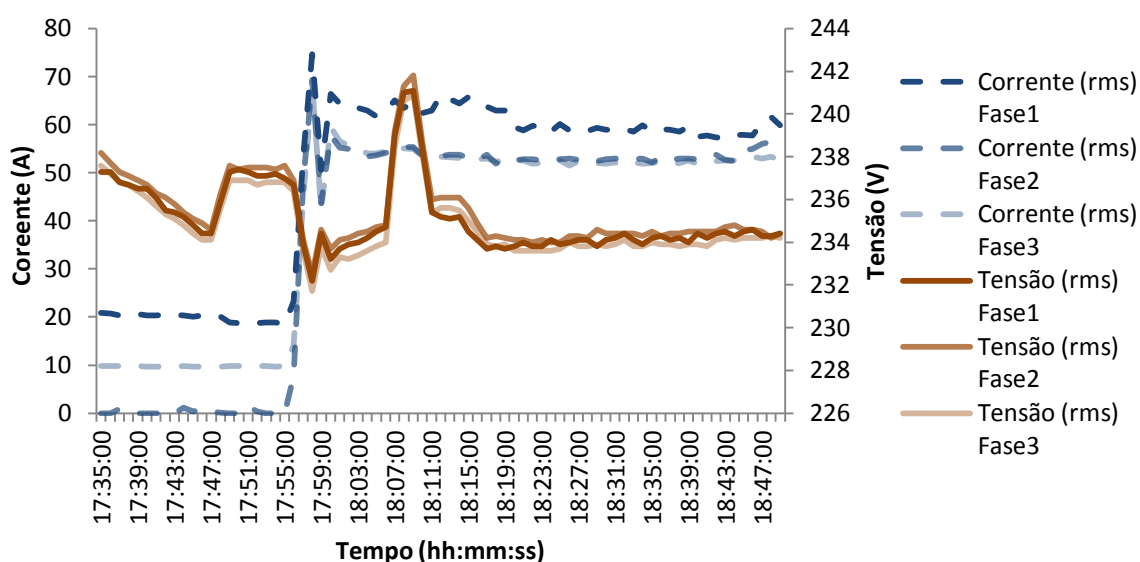


Figura 51 – Consumo de corrente (A) e tensão (V) no período de transição, no dia 6 de Novembro de 2012.

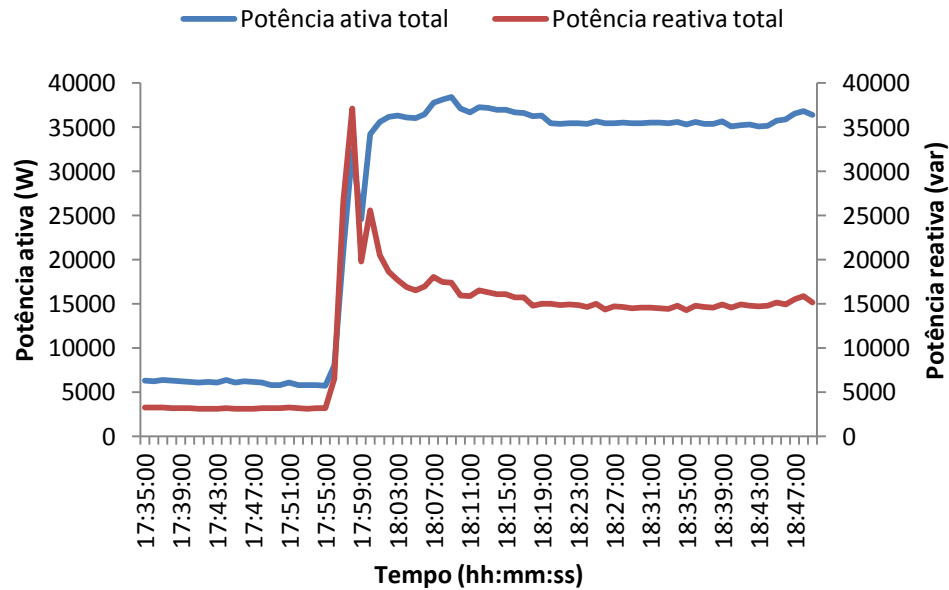


Figura 52 – Potência ativa e reativa total do sistema eléctrico do Nó de Évora Poente, no dia 6 de Novembro.

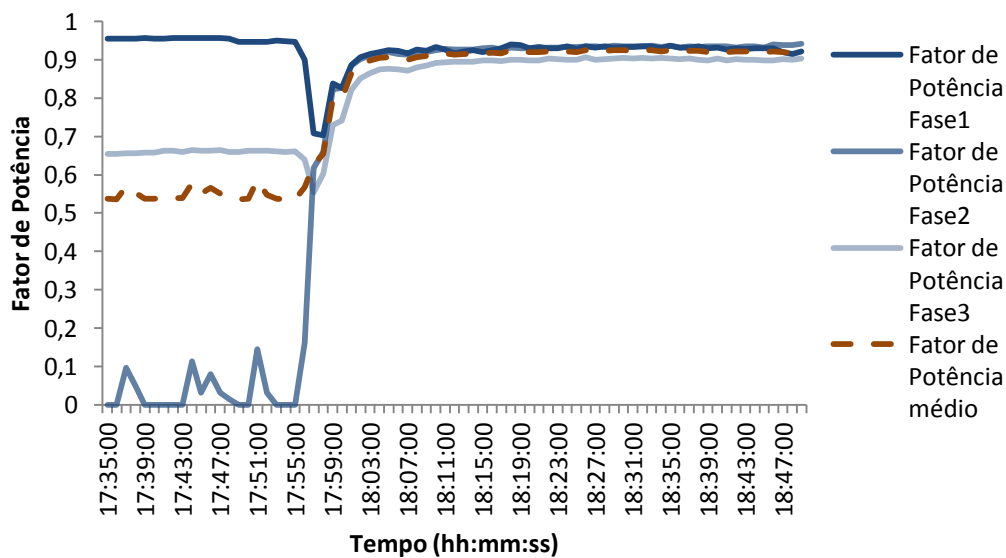


Figura 53 – Fator de potência do sistema eléctrico do Nó de Évora Poente, no dia 6 de Novembro.

A Figura 51 permite verificar que não existe qualquer equilíbrio nas fases da corrente antes de se iniciar a ligação do sistema de iluminação do Nó. Também se registaram sobretensões momentâneas (*swells*), subtensões momentâneas (*sags*) e sobretensões transitórias.

Constatou-se que no período antes da ligação do sistema de iluminação, entre as 17:35h e as 17:55h, as correntes nas fases apresentavam valores eficazes (*True RMS*) de 19,8 A, 0,3 A e 9,8 A e depois do sistema de iluminação estar ligado, entre as 18:59h e as 19:59h, as correntes nas fases apresentavam valores eficazes de 59 A, 57 A e 53 A. A ocorrência deste desequilíbrio nas fases de corrente antes do funcionamento do sistema de iluminação, deve-se à distribuição desigual das cargas consumidoras pelas 3 fases da rede eléctrica trifásica o que provoca também variações na tensão da rede eléctrica que abastece o local. No mercado existem soluções, como o filtro ativo do tipo paralelo [44], que permite o equilíbrio das fases entre outros benefícios.

Através da análise da Figura 52 é possível observar que dos, aproximadamente, 36 kW de potência ativa consumida, 83% são provenientes da iluminação e 17% referentes a consumos das máquinas das portagens e equipamentos do centro de operações. Dos 83% provenientes da iluminação total do Nó de Évora Poente, aproximadamente 30% são provenientes do sistema de iluminação de auto-estrada, o que equivalente a 8,9kW de potência consumida pelas 36 luminárias ligadas das 67 que existem. No caso dos 16kW de potência reativa consumida, 80% são provenientes da iluminação e 20% dos restantes equipamentos. Não é possível estimar a potência reativa consumida apenas pelo sistema de iluminação da auto-estrada porque não existe uma potência reativa associada a cada luminária ligada.

Isto indica que 83% da potência ativa e 80% da potência reativa são consumidas durante o período de funcionamento da iluminação, que corresponde a 4013h/anuais. Assim estimaram-se valores anuais para a energia ativa consumida e energia reativa, proveniente do sistema de iluminação total do Nó de Évora Poente, em 120MWh e 51MVarh respectivamente, que correspondem a 69% do total de energia ativa consumida em 2012 (173MWh), e 65% do total de energia reativa consumida em 2012 (78MVarh). O sistema de iluminação do Nó de auto-estrada apresenta um consumo de 35,7 MWh em 2012 e que corresponde a 21% do consumo total de energia ativa estimada para o ano de 2012.

O elevado consumo de energia reativa, que é só faturada nos períodos do vazio, pode dever-se às luminárias não incluírem os condensadores para compensação da energia reativa consumida pelos balastros ferromagnéticos com fator de potência de 0,87. A Figura 53 mostra a variação do fator de potência nas três fases durante o período de transição, atingindo um valor médio de 0,92 após a rede elétrica atingir a estabilidade. Mais uma vez o fator de potência dos balastros ferromagnéticos são os principais responsáveis pela rede elétrica apresentar um valor abaixo dos 0,96 ($\text{tg } \varphi > 0,3$) impostos pela EDP, para isenção de faturação da energia reativa consumida. Na secção 6.2, será estudado o impacto da substituição destes balastros por balastros eletrónicos.

A análise foi feita no período de transição, e não 1h depois do sistema de iluminação estar em funcionamento, porque era o único período que permitia caracterizar o consumo por tipo de cargas.

Após o estudo dos impactos dos consumos do sistema de iluminação na rede elétrica do Nó de Évora Poente, pretendeu-se avaliar o desempenho da tecnologia de iluminação vapor de sódio de alta pressão (VSAP) instalada nos Locais A e B, definidas na Secção 4.1, com recurso às medições e cálculos de valores de iluminância com base na norma EN13201. Para uma melhor compreensão das características da luz fornecida à superfície da estrada pela tecnologia de iluminação VSAP, fez-se uma análise luminotécnica das lâmpadas *MASTER SON-T PIA Plus : Philips*, VSAP_b, que têm características muito próximas às *MASTER SON-T PIA Hg-Free : Philips*, VSAP_a, atualmente instaladas. A diferença é que as lâmpadas VSAP_a não têm átomos de mercúrio no interior do tubo de arco, tendo como consequência uma diminuição do fluxo luminoso (lumens) disponível.

A Tabela 16 mostra as especificações das luminárias instaladas nos Locais A e B. Visto que os ficheiros IES da lâmpada *MASTER SON-T PIA Hg-Free: Philips* e da luminária *Hadasa M-250*, VSAP_a, não estão disponíveis para o *software* DIALux, usou-se uma lâmpada e luminária da mesma marca com características semelhantes, VSAP_b. Os fatores de depreciação considerados para o cálculo do fator de manutenção global são referentes a um período de 3 anos/ $\approx 12\,000\text{h}$.

Tabela 16 – Características das luminárias utilizadas no estudo luminotécnico dos Locais A e B do Nó de Évora Poente auto-estrada. Dados provenientes do fabricante

Tecnologia de iluminação	Família da lâmpada	Fabricante da luminária	Família do Produto	Potência da luminária (W)	Fluxo luminoso da lâmpada (lm)	Eficiência ótica da luminária (%)	Eficácia da luminária (lm/W)	CCT (K)	CRI	Fator de manutenção global
VSAP_a	MASTER SON-T PIA Hg-Free : Philips	GE Lighting Solutions	Hadasa M-250	277	28000	80,6	81,5	2150	25	0,76
VSAP_b	MASTER SON-T PIA Plus : Philips	Philips	Iridium SGS253 GB	277	33200	81	97,4	2000	25	0,83

O espectro de distribuição de potência da lâmpada VSAP que define a cor característica (fatores *CCT* e *CRI*) da fonte de luz, que se apresenta na Figura 54, permitiu determinar os lúmens fotópicos incorporados pelo olho humano, através da Figura 55, porque, nos termos da norma, para iluminação de auto-estrada apenas os lúmens fotópicos devem ser considerados. Esta característica pode ser usada como fator determinante no dimensionamento eficiente de um sistema de iluminação visto que as tarefas que envolvem a visão central, durante a condução na auto-estrada, dependem da visão fotópica para obter uma maior segurança. Este gráfico permitiu perceber o efeito da distribuição espectral de potência no desempenho da visão sobre as condições fotópicas e escotópicas.¹⁶

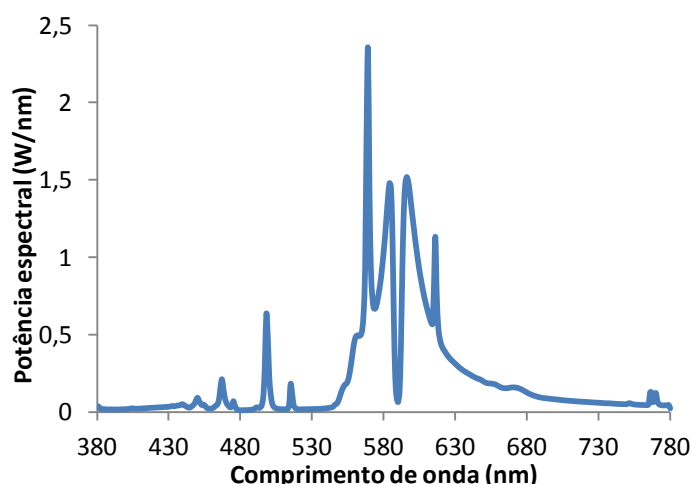


Figura 54 – Espectro de distribuição de potência da lâmpada (*Spectral power distribution*) *Master Son-T PIA 250W* (W/nm). Dados disponibilizados pela Philips ®.

¹⁶ Na realidade, sob iluminação noturna verificam-se condições mesópicas, sendo, do meu ponto de vista, importante avaliar a visibilidade na condução sobre iluminação proveniente de lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, ou luminárias LED, em condições mesópicas, tal como se referencia no estudo *Road Lighting Quality, Energy Efficiency, and Mesopic Design – LED Street Lighting Case Study, 2011 Illuminating Engineering Society of North America (IES)*. No entanto, tal não foi feito uma vez que tal não se encontra previsto na norma.

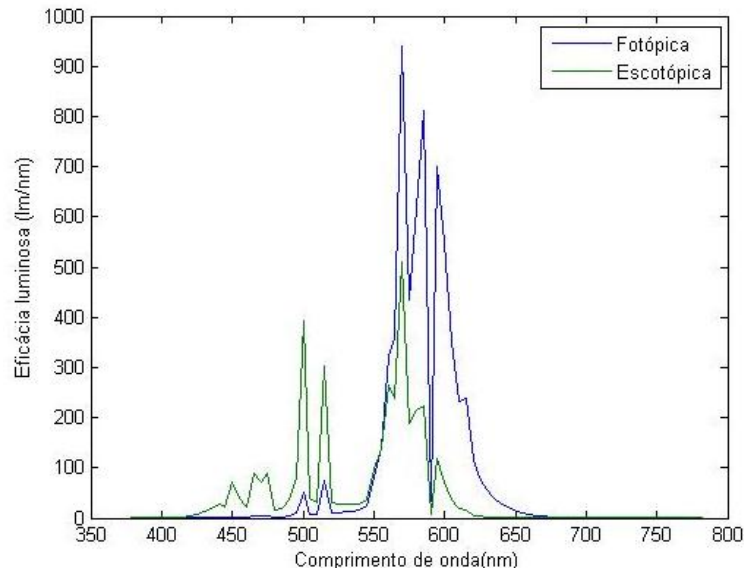


Figura 55 – Função de lumens fotópicos e escotópicos por *nm* incorporados pelo olho Humano. (Espectro de distribuição de potência da lâmpada *Master Son-T PIA 250W (W/nm)* (Figura 54) foi multiplicado pelo espectro de sensibilidade fotópica e escotópica (*lm/W*)(Figura 12b)).

Através da análise da Figura 55, é possível perceber que estas lâmpadas têm uma quantidade elevada de lumens fotópicos permitindo assim ativar os cones presentes na retina e melhorar a precisão da visão frontal adquirindo uma maior nitidez, reconhecimento e percetibilidade dos elementos presentes no troço de estrada.

Como mostra Tabela 17, também foram considerados outros fatores, calculados com recurso à metodologia presente na Secção 5.3, que permitiram avaliar em pormenor a eficácia do sistema de iluminação no fornecimento de fluxo luminoso para a área relevante em estudo. No caso das características da lâmpada VSAP_a, que foi determinada através da digitalização utilizando uma rotina MATLAB dos gráficos de espectros de distribuição de potência presentes na folha de características do fabricante, a diferença de valores deve-se aos 28000 lumens nominais considerados na conversão dos valores obtidos, porque os dados fotométricos vêm em $\mu\text{W}/5\text{nm}/\text{lumen}$ para que seja independente do fluxo luminoso da lâmpada. Também se realizou a digitalização dos gráficos presentes na folha de dados da lâmpada VSAP_b de forma a comparar com os valores fornecidos pelo fabricante e ser possível validar a precisão da ferramenta de digitalização. Assim, os parâmetros que apresentam a insígnia (*matlab-estimado*) foram obtidos pelo método de digitalização.

Tabela 17 – Características luminotécnicas importantes das lâmpadas *MASTER SON-T PIA Plus: Philips*, VSAP_b e *MASTER SON-T PIA Hg-Free: Philips*, VSAP_a.

Tecnologia	Potência da lâmpada, $W_{\text{elétrico}}$ (W)	Fluxo luminoso da lâmpada (lm)	Potência Visível, $W_{\text{visível}}$ (W)	η_{descarga} (%)	Lumens fotópicos lâmpada, F (lm)	Lumens escotópicos lâmpada, F' (lm)	$\eta_{\text{visível}}$ (lm/W)	$\eta_{\text{lâmpada}}$ (lm/W)	$\eta_{\text{luminária}}$ (lm/W)
VSAP_b 250W	250	33200	84,9	33,9	32303	18667	380,6	129,2	90,6
VSAP_b 250W (<i>matlab-estimado</i>)	250	33200	88,6	35,5	33360	20003	376,5	133,4	93,6
VSAP_a 250W (<i>matlab-estimado</i>)	250	28000	75,8	30,3	29856	20614	393,8	119,4	83,8

A Figura 56 mostra o perfil de distribuição da iluminância na área relevante analisada do Local A, malha de 10x4, e do Local B, malha de 16x3, para as luminárias VSAP_a e VSAP_b*¹⁷. No caso do Local B, o perfil de iluminâncias engloba as 2 faixas de rodagem. Os gráficos a) e c) apresentam valores medidos enquanto os gráficos b) e d) apresentam valores calculados.

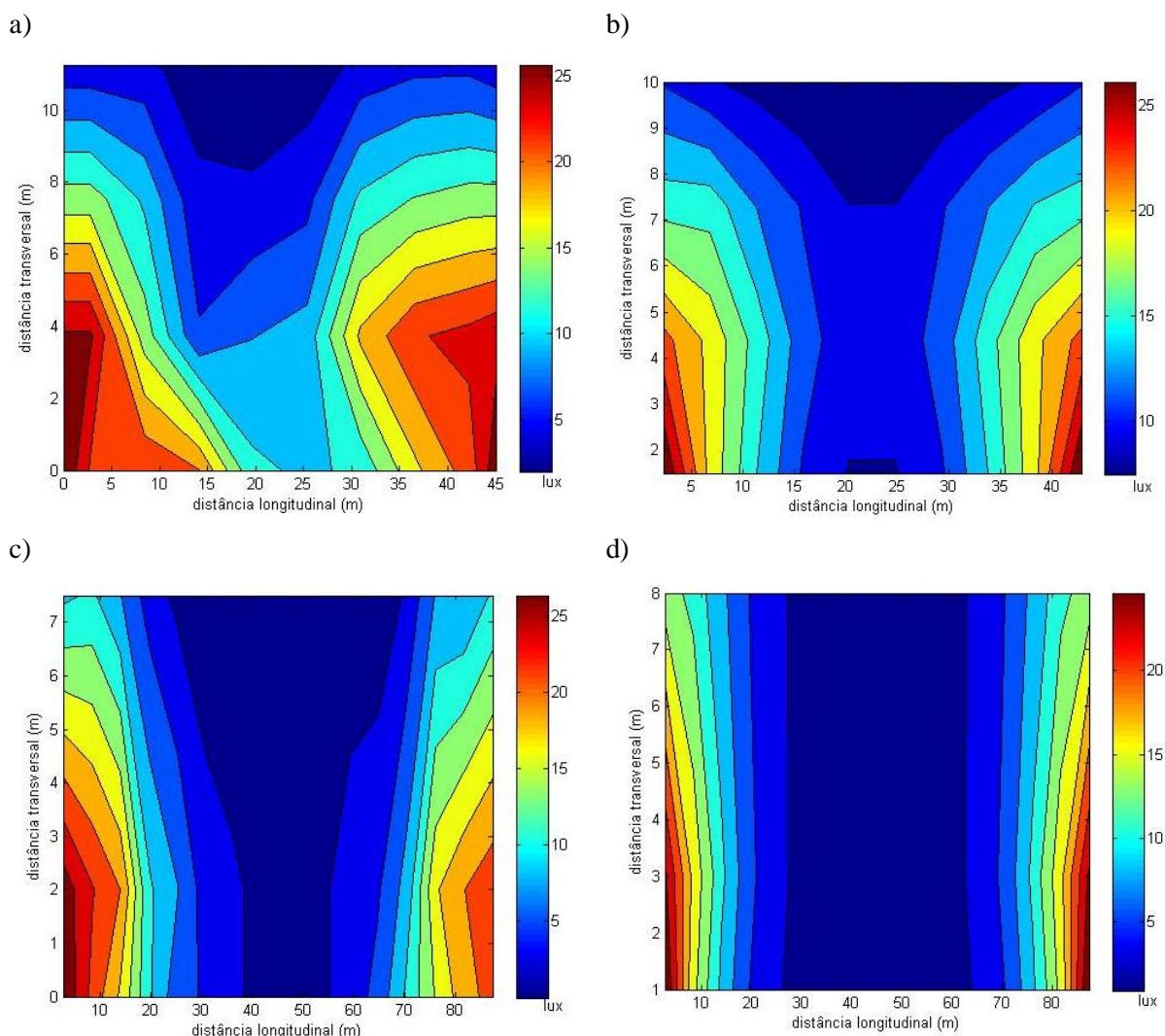


Figura 56 – a) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) medida no troço de auto-estrada, Local A, com luminária de 250W VSAP_a instalada aos 0m e 45m; b) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local A, com luminária de 250W VSAP_b* instalada aos 0m e 45m; c) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) medida no troço de auto-estrada, Local B, com luminária de 250W VSAP_a instalada aos 0m e 90m; d) Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local B, com luminária de 250W VSAP_b* instalada aos 0m e 90m

Salienta-se o facto de o luxímetro utilizado apresentar um baixo grau de sensibilidade (não é sensível à décima de lux) e a dificuldade de aplicar os pontos de medição determinados pelo método de cálculo da norma EN13201-3 durante a passagem de tráfego automóvel. Estes dois factores justificam a maior dispersão dos resultados experimentais (a) e c)) relativamente à simulação computacional (b) e d)).

¹⁷ A não existência da luminária VSAP_a na biblioteca de componentes luminotécnicas do DIALUX obrigou à utilização de um método aproximado de simulação para estas luminárias. Tal método consistiu na utilização do ficheiro correspondente à luminária VSAP_b com um factor de correcção que permitisse ter um fluxo luminoso à saída desta luminária equivalente à VSAP_a. No que se segue, esta luminária virtual, VSAP_b afectada do fator de correcção 0.843, será designada por VSAP_b*, e é, portanto, equivalente em termos de fluxo luminoso à saída à luminária VSAP_a que efectivamente se encontra instalada no terreno. As limitações desta aproximação serão discutidas a propósito da discussão dos resultados da Tabela 18.

Tanto os resultados das medições como as simulações mostram que a via de trânsito interior, mais à esquerda, situada acima dos 8 metros transversais apresenta iluminâncias entre os 14 lux e 5 lux, sendo que esse valor atinge o máximo quando está em linha transversal com a luminária, que se apresenta aos 0m e 45m, e atinge o valor mínimo na distância longitudinal central, 25m, onde se verifica um grande contraste de iluminação, semelhante a uma sombra. Esta situação mostra que não existe homogeneidade da iluminação no troço de estrada entre 2 luminárias, porque no local próximo da luminária tem-se valores acima dos 15lux requeridos pela norma CIE115:2010, mas à medida que se afasta na transversal e longitudinal esse valor diminui, sendo mais perceptível na via de trânsito mais à esquerda na distância longitudinal entre a os 15m e os 30m.

Nas figuras c) e d) que correspondem ao Local B, em que as luminárias estão situadas nos 0m e 90m longitudinais, o efeito “sombra” é ainda mais evidente abrangendo uma área ainda maior que vai desde os 25 metros aos 65 metros longitudinais englobando as 3 vias de trânsito. Esta falta de homogeneidade da iluminância no pavimento contribui para que não se atinja uma iluminância média de 15 lux requerida pela recomendação CIE115:2010, ou 1cd/m^2 requerida pela norma EN13201, para uma classe de iluminação ME3a. Uma outra consequência da falta de homogeneidade é o incumprimento dos mínimos regulamentados para os parâmetros da uniformidade longitudinal e global impostos pela norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a. Para além disso compromete a visibilidade, segurança e conforto dos condutores, visto que os níveis de luminância (cd/m^2) são muito inferiores a 1cd/m^2 exigidos pela norma EN13201 e o troço de auto-estrada é considerada como uma área de conflito com elevada probabilidade de acidentes se não verificar-se as condições técnicas de segurança exigidas. Neste caso, a elevada interdistância entre as duas luminárias ligadas, 90m, é o principal fator responsável pelo não cumprimento da norma.

A Tabela 18 mostra a iluminância (lux), medida e calculada, nas Áreas A e B, com a luminária VSAP_ e VSAP_b*.

Tabela 18 – Iluminância medida *versus* calculada para os Locais A e B do Nó auto-estrada Évora Poente, considerando as luminárias VSAP_a, VSAP_b e VSAP_b*

Local	Distância entre postes (m)	Tipo	Iluminância horizontal média, $E_{\text{médio}}$ (lux)			$E_{\text{min}}/E_{\text{m}}$		
			Medido	Calculado DIALux	Diferença (%)	Medido	Calculado DIALux	Diferença (%)
A	45	VSAP_a	13,50	-----	-----	0,15	-----	-----
		VSAP_b*	-----	13,70	-1%	-----	0,54	-41%
B	90	VSAP_a	9,10	-----	-----	0,11	-----	-----
		VSAP_b*	-----	7,60	16%	-----	0,12	-1%

No caso do Local A a diferença encontrada na iluminância horizontal média corresponde a uma depreciação para 98,5% dos lumens nominais, valor abaixo do esperado tendo em atenção que de acordo com as especificações do fabricante é expectável uma depreciação para 93% às 20 000 de funcionamento que já apresentava a lâmpada instalada. Em relação aos valores de $E_{\text{min}}/E_{\text{m}}$ a diferença deve-se provavelmente: i) à diferente curva de distribuição de intensidade luminosa no pavimento visto que as ópticas são de tipo e marcas diferentes; ii) à imprecisão das medições realizadas devido à imprecisão do luxímetro e à circulação ininterrupta dos automóveis.

No caso do Local B a diferença entre os valores de iluminância medidos e calculados para a luminária VSAP_a e VSAP_b* respectivamente, deve-se à imprecisão das medições e à definição da malha de pontos na auto-estrada, porque o primeiro ponto na malha definida para a medição de pontos é a 2,8 metros da 1ª luminária na longitudinal e em cima da linha contínua da estrada na transversal, enquanto o primeiro ponto na malha definida pelo DIALux é a 2,8 metros da 1ª luminária na longitudinal e a 1m da linha contínua da estrada na transversal. Assim, todos os pontos da primeira linha (16x1) próxima à luminária apresentam valores de iluminância menores comparativamente com a primeira linha (16x1) da malha definida para a medição *in situ*. A tabela presente no Anexo IV –

Distribuição da iluminância medida na área relevante analisada do Local A para a Luminária VSAP_a, Anexo V – Distribuição da iluminância calculado na área relevante analisada do Local A para a Luminária VSAP_b*, Anexo VI – Distribuição da iluminância medida na área relevante analisada do Local B para a Luminária VSAP_a e Anexo VII – Distribuição da iluminância calculada na área relevante analisada do Local B para a Luminária VSAP_b* permite evidenciar as limitações de criar e pôr em prática a medição de uma malha de pontos sem interrupção do fluxo automobilístico. Acresce que, neste caso, por estarmos na presença de um número significativo de locais com um fluxo luminoso muito baixo, a falta de sensibilidade do luxímetro pode ser mais relevante (por exemplo, para todos os locais onde esteja presente um fluxo entre 1,5 e 2 lux serão “medidos” valores de 2lux). Neste caso não existem diferenças significativas entre os valores de E_{min}/E_m medidos e calculados porque o valor mínimo das medições e das simulações ser muito próximo.

De uma forma geral, a comparação dos resultados medidos com os simulados mostram que as luminárias instaladas nos locais A e B se encontram em bom estado, o que é compatível com o facto de as armaduras terem apenas 5 anos de utilização e apresentarem um índice de proteção elevado (IP65)¹⁸. As lâmpadas têm aproximadamente 20 000h de operação que corresponde a uma depreciação de 7% dos lumens emitidos.

Após a comparação entre os valores de iluminância medidos e calculados nos Locais A e B, para as luminárias em estudo, avaliaram-se os parâmetros fotométricos requeridos pela norma EN13201, luminância, e pela recomendação CIE115:2010, iluminância, de forma a verificar se cumprem os valores tabelados de acordo com a classe de iluminação ME3a. Note-se que não foi possível medir os parâmetros requeridos pela norma EN13201 por falta de equipamento específico, daí ser necessário calcular os valores recorrendo ao *software* DIALux e a uma luminária com características técnicas semelhantes.

A Tabela 19 mostra as quantidades fotométricas calculadas através do *software* DIALux, tendo como termo de comparação os valores normalizados impostos pela norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a.

Tabela 19 – Caracterização fotométrica do Local A e B através do DIALux proporcionada pela luminária VSAP_b*¹⁹. Comparação com os valores requeridos pela norma EN13201.

Local	Método de cálculo	Iluminância média, E_{medio} (lux)	Luminância média, L_{medio} (cd/m ²)		Uniformidade Global, U_o	Uniformidade Longitudinal, U_L	Encadeamento perturbador, TI (%)	Iluminação Envolvente
	Valor normalizado, M3a (EN13201)	15,0	≥ 1		$\geq 0,4$	$\geq 0,7$	≤ 15	0,5
A	Cálculo DIALux, VSAP_b*	14,0	Via de trânsito da Esquerda	0,90	0,42	0,81	5	-----
			Via de trânsito Central	0,82	0,45	0,88	9	-----
			Via de trânsito da Direita	0,74	0,48	0,90	11	-----
B	Cálculo DIALux, VSAP_b*	6,10	Faixa de rodagem oposta	0,30	0,41	0,25	15	-----
		8,40	Faixa de rodagem da Luminária	0,55	0,26	0,16	14	-----

¹⁸ É um parâmetro que define quais as características de um aparelho de iluminação quanto à agressividade do ambiente e condições de intempérie. O primeiro dígito, 6, indica que a armadura está totalmente protegida contra a entrada de poeira e contacto com as partes internas do invólucro e o segundo dígito, 5, indica que a armadura tem proteção contra jatos de água.

¹⁹ *Cálculos realizados com o DIALux com fator de correção 0,843.

A Tabela 19 mostra que as luminárias instaladas nos Locais A e B, não conseguem satisfazer os requisitos da recomendação CIE115:2010 e da norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a²⁰.

O Local B apresenta os valores fotométricos mais afastados dos valores normalizados impostos pela norma e pela recomendação devido à colocação das luminárias na estrada. No Local B, um troço que engloba duas faixas de rodagem, em que cada uma tem uma via de trânsito, é perceptível que a faixa de rodagem oposta à faixa de rodagem onde estão colocadas as luminárias tem uma iluminação muito insuficiente, o que transmite uma percepção de escuridão e de visibilidade nula para os condutores que usam aquela faixa de trânsito para se dirigirem à portagem. A baixa luminância no Local B pode levar aos condutores uma falsa percepção dos limites da via de trânsito e a falhas na identificação dos obstáculos existentes. O facto de o Local B apresentar um separador central de betão e apenas uma via de trânsito, faz com que o condutor tenha ainda uma menor margem de manobra caso haja algum imprevisto durante a tarefa de condução.

A uniformidade global e longitudinal no Local B também é inferior ao requerido pela norma EN13201, sendo apenas a uniformidade global na faixa de rodagem oposta à luminária superior a 0,4 porque existe maior proximidade entre o valor mínimo e o valor médio de iluminância nessa faixa. É importante frisar que o facto de haver um espaçamento longitudinal de 90m entre duas luminárias, porque a luminária presente nos 45m se encontra apagada, e essas luminárias estarem só colocadas numa das faixas de rodagem e afastadas 3 metros da via de trânsito vai originar grandes áreas de sombra na via de trânsito oposta à luminária, um elevado contraste na via de trânsito próxima às luminárias e uma uniformidade da iluminância muito baixa em todo o Local B.

O Local A apresenta os mesmos problemas, mas com menos intensidade, porque as luminárias têm uma distância entre si de 45 metros. Mesmo não conseguindo as luminárias proporcionar uma iluminância superior a 15 lux no pavimento, e, consequentemente, o pavimento não ser percebido pelos condutores com uma luminância superior a 1 cd/m^2 , a uniformidade é superior aos valores normalizados o que indica que os sombreamentos verificados na Figura 56 são aceitáveis para um troço de estrada de classe de iluminação ME3a.

Sabendo os valores de iluminância nos Locais A e B com as luminárias VSAP_b* instaladas foi possível determinar o índice de eficiência energética dos dois troços. Para tal tomaram-se em consideração os seguintes factos:

- i) O valor de iluminância calculado para o Local A é de 14 lux e para o Local B é de 8,4 lux para a faixa de rodagem mais próxima das luminárias;
- ii) A área do Local A é de 45m x 12,05m e do Local B é de 90m x 4,15 m;
- iii) A potência total instalada em cada Local é de 554W (duas luminárias com potência de entrada de 277 W cada uma).

Determinou-se que o Local A tem um índice de eficiência energética de 13,7 lm/W, enquanto a faixa de rodagem próxima à luminária no Local B tem um índice de eficiência energética de 5,7 lm/W. Não foi sequer calculado o índice de eficiência energética para a outra faixa de rodagem no Local B, que será ainda manifestamente inferior. A classe energética dos locais estudados corresponde à letra G, que corresponde aos índices de eficiência energética inferiores ou iguais a 15 lm/W. Assim, dada a colocação das luminárias e a tipologia da estrada, mesmo que o sistema de iluminação cumprisse os 15 lux no pavimento, a classe de eficiência energética continuava a ser letra G.

No âmbito da avaliação de custos do sistema de iluminação rodoviária em estudo, segundo o método do custo do ciclo de vida (*Life cycle costs method*, LCC) presente na Secção 2.3.3 e abordado também pelo capítulo 10.2 do DRREIP, a Tabela 20 mostra os valores estimados do custo de instalação (C_{in}), do custo de operação (C_{op}), do custo do ciclo de vida do sistema de iluminação (C_{aa}) segundo os dados disponibilizados pela BRISA e os seguintes pressupostos:

²⁰ No caso da recomendação CIE115:2010, o valor de 15 lux é obtido considerando as propriedades de reflexão do pavimento da auto-estrada, $R_3 - q_0 = 0,07 \text{ cd/m}^2 \cdot \text{lux}$, Tabela 9, e a expressão $E = L/q_0$ (lux) em que a iluminância é igual ao quociente entre a luminância e o valor de reflexão do pavimento.

- No cálculo do custo da instalação (C_{in}), os fatores custo da coluna e fundação por unidade (C_{co}) e o custo da luminária e a primeira lâmpada por unidade (C_{lu}) têm incluído o custo da mão-de-obra (a sinalização e encerramento da AE, teoricamente, não é necessária porque na primeira instalação a AE ainda não está aberta ao tráfego). O troço de estrada considerado apresenta-se descrito na Figura 49. O custo da rede elétrica desde do quadro (incluindo cabos, mão-de-obra, valas, etc.) por metro de estrada (C_{ps}), no caso português, a EDP Distribuição, cobra (ou fazia-o em 2007) para baixadas em baixa tensão em média 26,08€ por metro em rede de baixa tensão subterrânea (para potências entre 34,5kVA e 65,55kVA, inclusive) [45].
- No cálculo do custo de operação (C_{op}), a tarifa média do contrato de energia é de 0,0633 €/kWh (Tarifário Tetra-horário: Energia+Redes – MT (média tensão)). O custo da substituição conjunta das lâmpadas (C_{gr}) e o custo da substituição individual da lâmpada por unidade (C_{ir}) têm incluído o custo da mão-de-obra.
- No cálculo do custo do ciclo de vida pelo método dos custos médios anuais (C_{aa}), a taxa de juro aplicada (i) é de 5% [11]. Os anos de serviço da iluminação (t) são 20 anos [11].

O Anexo VIII – Síntese dos parâmetros necessários para avaliação dos custos do sistema de iluminação através do método de análise do custo do ciclo de vida da recomendação CIE115:2010 apresenta uma tabela com o valor definido para cada parâmetro utilizado na avaliação do custo sistema de iluminação.

Tabela 20²¹ – Aplicação do método do custo do ciclo de vida, sugerido pela recomendação CIE115:2010, ao sistema de iluminação do nó de auto-estrada de Évora Poente.

Avaliação de custos		Custo da instalação, C_{in} (€/m)	Custo de operação, C_{op} (€/m)	Custo do ciclo de vida, C_{aa} (€/m)
Sistema de iluminação do nó de Évora Poente	Local A	53,64	5,14	13,60
	Local B	42,64	2,57	8,06

Depois de uma pesquisa exaustiva não foram encontrados outros valores para estes custos que permitam fazer uma análise comparativa.

²¹ O volume de tráfego médio diário, V_{ADT} (veículos/dia), não foi calculado devido aos parâmetros não serem monitorizados pela concessionária. Desta forma, não existe dados disponíveis que permitam determinar este fator.

6.2 Desenvolvimento do estudo de Remodelação (*Retrofit*) do sistema de iluminação existente

Como se viu na secção anterior, a iluminação projetada para o Nó de Évora-Poente da A6 não cumpre as normas de iluminação no que se refere à luminância média, embora cumpra a referida norma no que se refere aos restantes parâmetros luminotécnicos. Nos casos em que, relativamente à iluminação projetada, foi feita a alteração de supressão alternada de luminárias, Local B, a norma não é cumprida relativamente à quase totalidade dos parâmetros. Visto a interdistância entre as luminárias ser elevada, 90m, qualquer alteração de remodelação ao sistema de iluminação vai ser insuficiente para que nesse local sejam obtidos os parâmetros fotométricos em conformidade com os valores normalizados na norma EN13201. Percebe-se que é necessário a ligação da luminária situada aos 45m longitudinais para que se possa obter resultados com a remodelação do sistema de iluminação presente.

No Local A, dado a interdistância de 45m entre as luminárias permitir estudar medidas de remodelação do sistema de iluminação, realizou-se um estudo de aplicação de medidas que requerem mínima intervenção: i) diminuição da altura das colunas de iluminação; ii) alteração da lâmpada MASTER SON-T PIA Hg-Free: Philips 250 W pela lâmpada MASTER SON-T PIA Plus: Philips 250W. A Figura 57 mostra a variação dos parâmetros fotométricos com a variação da altura da coluna de iluminação para luminárias com lâmpadas MASTER SON-T PIA Hg-Free: Philips, VSAP_b*, e MASTER SON-T PIA Plus: Philips, VSAP_b, no Local A.

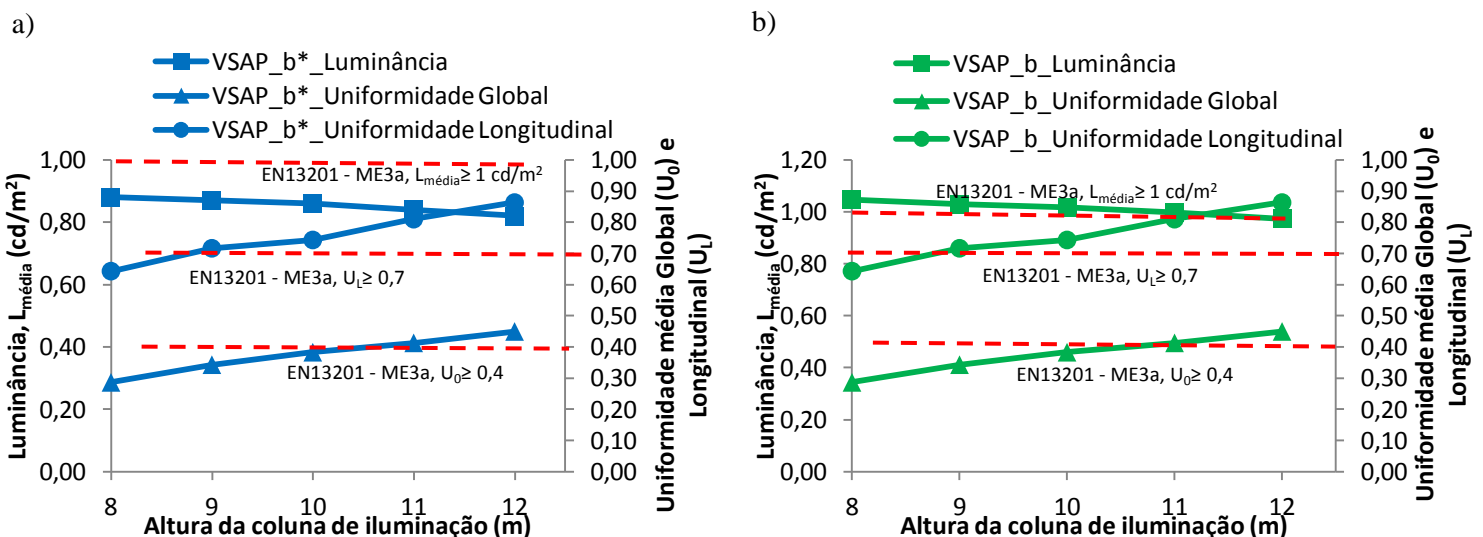


Figura 57 – Variação da luminância, uniformidade global e uniformidade longitudinal com altura do poste onde está instalada a armadura a) VSAP_b* e b) VSAP_b. O local considerado é o Local A.

Constata-se pela Figura 57 que, como seria de esperar, com a diminuição da altura da coluna de iluminação dá-se um aumento dos valores de luminância e uma diminuição da uniformidade no pavimento. De uma forma geral a diminuição da altura da coluna para os 10m, mesmo mantendo as luminárias atualmente instaladas, aproxima significativamente os parâmetros luminotécnicos dos valores impostos pela EN13201. Para uma altura de coluna de 11m, a substituição das lâmpadas atualmente existentes pelas lâmpadas VSAP_B permitiria, com a mesma potência instalada, cumprir a referida norma relativamente a todos os parâmetros.

Relativamente à luminância, a diferença de valores deve-se ao facto de a lâmpada MASTER SON-T PIA Plus: Philips, VSAP_b, apesar de ter a mesma potência nominal, ter a capacidade de emitir mais 5200 lúmens em comparação com a lâmpada MASTER SON-T PIA Plus: Philips, VSAP_b*. Assim, a tecnologia de iluminação VSAP_b consegue cumprir os requisitos da norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a se for instalada numa coluna de iluminação com 11m de altura. A instalação da tecnologia de iluminação VSAP_b* para as diferentes alturas da coluna de iluminação não permite cumprir a norma porque os valores de luminância são sempre inferiores a 1cd/m^2 impostos pela norma para a classe de iluminação ME3a.

Relativamente à uniformidade a superfície da estrada apresenta um desempenho insatisfatório para os condutores como fundo para marcas rodoviárias e objetos com a diminuição da altura da coluna de iluminação. Os valores de uniformidade são iguais para as duas luminárias porque a componente ótica da luminária é igual, sendo, dessa forma a distribuição da intensidade luminosa equivalente.

Relativamente à substituição dos balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos importa começar por referir o seguinte: visto os valores fotométricos do sistema de iluminação atual não satisfazerem os requisitos da norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a não parece fazer qualquer sentido estarmos ainda a considerar a hipótese de instalar balastros eletrónicos para fazer ainda uma redução dos consumos em determinadas horas da noite. No entanto, este tipo de estudo justifica-se para podermos ter uma ideia do tipo de poupanças que seria possível obter, se a solução adotada envolvesse a subdivisão do período de iluminação em vários subperíodos como sugere a recomendação CIE115:2010. Acresce que este tipo de balastros permite ainda fazer a correção do fator de potência, o que dará origem a poupanças significativas.

Os subperíodos de iluminação foram otimizados para o período de Inverno devido ao período de funcionamento do sistema de iluminação ser neste caso de 13h. Assim, para o Local A, classificou-se a classe de iluminação do troço estudado segundo a metodologia apresentada pela recomendação CIE115:2010. Definiram-se três subperíodos de iluminação de acordo com o tráfego médio diário mensal próximo ao nó de Évora Poente²²:

- 1) Período de iluminação desde que são ligadas as luminárias até 1 hora depois da hora de maior fluxo automobilístico, Δt_1 (18:00h – 22:00h);
- 2) Período de iluminação desde o início da diminuição do fluxo automobilístico até 30 minutos antes do período de maior fluxo automobilístico, Δt_2 (22:00h – 6:30h);
- 3) Período de iluminação desde o início do período de maior fluxo automobilístico até ao desligar do sistema de iluminação, Δt_3 (6:30h – 7:00h).

No primeiro e terceiro período o sistema de iluminação encontra-se em funcionamento à potência nominal, enquanto no segundo período propõe-se uma redução de potência para 60% do valor instalado. Para o período de Verão, apenas são considerados dois períodos de iluminação porque o sistema de iluminação é desligado às 6 da manhã. Assim, os períodos de iluminação são, nesse caso, os seguintes:

- 1) Período de iluminação desde que são ligadas as luminárias até 1 hora depois da hora de maior fluxo automobilístico, Δt_1 (21:00h – 23:00h);
- 2) Período de iluminação desde o início da diminuição do fluxo automobilístico até ao desligar do sistema de iluminação, Δt_2 (23:00h – 6:00h);

No primeiro o sistema de iluminação encontra-se em funcionamento à potência nominal, enquanto no segundo período apresenta uma redução de 60%. Haverá 1h (entre as 22h-23h) em que o sistema de iluminação se encontra em funcionamento à potência nominal, no entanto, 60% da potência luminosa seria suficiente para cumprir a recomendação.

²² Note-se que esta recomendação não define, entre outras coisas, os limites de tráfego que devem presidir à escolha destes subperíodos de forma quantitativa.

A Tabela 21 mostra os resultados da classe de iluminação para os três períodos determinados segundo o método sugerido pela recomendação CIE115:2010.

Tabela 21 – Método de seleção da classe de iluminação de uma estrada, sugerida pela recomendação CIE115:2010.

Parâmetros	Opções	Valor, V_w	V_w selecionado		
			Δt_1	Δt_2	Δt_3
Velocidade	Muito Alta	1	1	1	1
	Alta	0,5			
	Moderada	0			
Volume de Tráfico	Muito Alta	1	1		1
	Alta	0,5			
	Moderada	0		0	
	Baixa	-0,5			
Composição do Tráfico	Muito Baixa	-1			
	Misturado com elevada percentagem de não motorizados	2			
	Misturado	1			
Separação da faixa de rodagem	Apenas Motorizados	0	0	0	0
	Não	1			
Densidade entre acessos	Sim	0	0	0	0
	Elevada	1			
Estacionamento	Moderada	0	0	0	0
	Presente	0,5			
Luminosidade Ambiente	Não Presente	0	0	0	0
	Elevada	1			
	Moderada	0	0	0	0
Complexidade do campo visual /Controlo de tráfico	Baixa	-1			
	Mau	0,5			
	Moderado ou Bom	0	0	0	0
Soma dos valores atribuídos, V_{ws}			2	1	2
$ME = 6 - V_{ws}$			ME4	ME5	ME4

Através da Tabela 21, percebe-se que o método de classificação sugerido pela recomendação CIE115:2010 entra em contradição com o método da norma EN13201. Nos termos da recomendação, obter-se-ia uma classificação de ME4 em vez da classificação ME3a determinada pela aplicação da norma. Os valores fotométricos normalizados exigidos por cada classe de iluminação continuam a ser definidos pela norma EN13201.

Após a caracterização do período de iluminação foram estudados dois cenários: i) substituição dos balastros ferromagnéticos por balastros electrónicos para as luminárias VSAP_b* e VSAP_b; ii) Substituição por armaduras LED com regulador de fluxo luminoso.

- **Cenário 1 – Substituição dos balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos para as luminárias VSAP_b* e VSAP_b**

No caso da substituição dos balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos, descrito na Tabela 22, vão ser considerados 3 períodos noturnos em que o nível de fluxo luminoso vai ser definido segundo o fluxo automobilístico horário apresentado na Figura 43, a variação do tráfego médio diário mensal da auto-estrada A6, Figura 40, e a variação do tráfego médio diário mensal (TMDM) nos sublaços antes e após o Nó de Évora Poente, Figura 44.

Tabela 22 – Dados técnicos do balastro eletrónico ECOLUM EC4 [34].

Referência	EC4-150	EC4-250D
Potência da lâmpada VSAP (W)	150	250
Potência reduzida em rede (W)	90	150
Fator de potência	0,98	0,98
Limites da tensão (V)	190-253	
Corrente a 230V (A)	0,66	1,10

No caso dos balastros eletrónicos, ECOLUM EC4, Anexo IX – Balastro eletrónico ECOLUM, o sistema de iluminação tem um relógio astronómico definido para que o tempo de funcionamento do sistema de iluminação seja de 13h (18h – 7h) no primeiro e quarto trimestre (Janeiro, Fevereiro, Março, Outubro, Novembro, Dezembro) e de 9h (21h – 6h) no segundo e terceiro trimestre (Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro). O programa usado pelo balastro eletrónico é o de temporizador programado, presente no Anexo X – Princípio de funcionamento do temporizador programado do balastro eletrónico, em que é definido sempre um programa de redução de fluxo depois do ponto médio e o período antes do ponto médio são as 2,5 h predefinidas pelo balastro. Então o balastro eletrónico num ano determina 2 pontos médios. Definiram-se primeiro os períodos horários diários onde vai haver redução da potência segundo a programação do relógio astronómico. O período de iluminação de Inverno, Figura 58, apresenta um ponto médio às 00:30h e o período de iluminação de Verão apresenta, Figura 59, um ponto médio à 01:30h. Considerou-se que o balastro eletrónico está configurado para um período de 2,5 h de potência reduzida antes do ponto médio e 6h de potência reduzida depois do ponto médio. No Verão apesar de o balastro eletrónico estar configurado para 6h de potência reduzida depois do ponto médio, apenas 4,5 h vão ser necessárias devido ao facto de a iluminação se desligar às 06:00 da manhã.

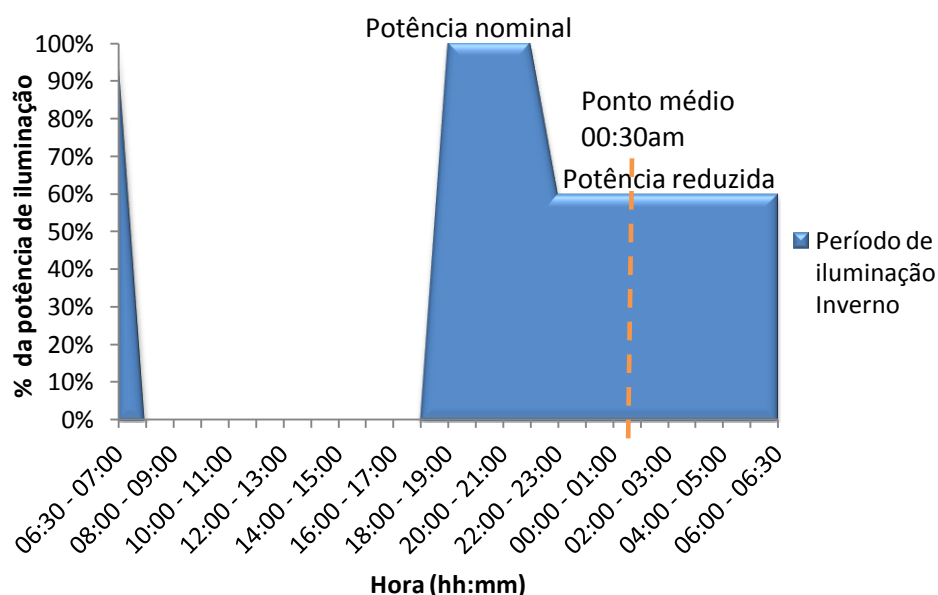


Figura 58 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Inverno após a implementação do balastro eletrónico.

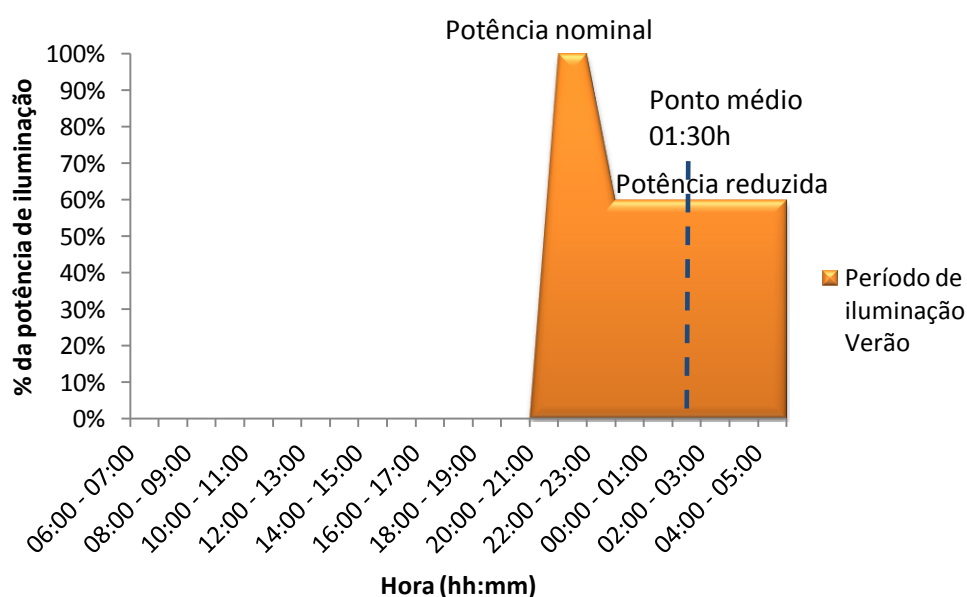


Figura 59 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Verão após a implementação do balastro eletrónico.

A Figura 60 apresenta a variação da iluminância e luminância com a redução da potência luminosa das luminárias em períodos de baixo fluxo automobilístico, para os Locais A e B, tendo como referência a os valores da norma e da recomendação.

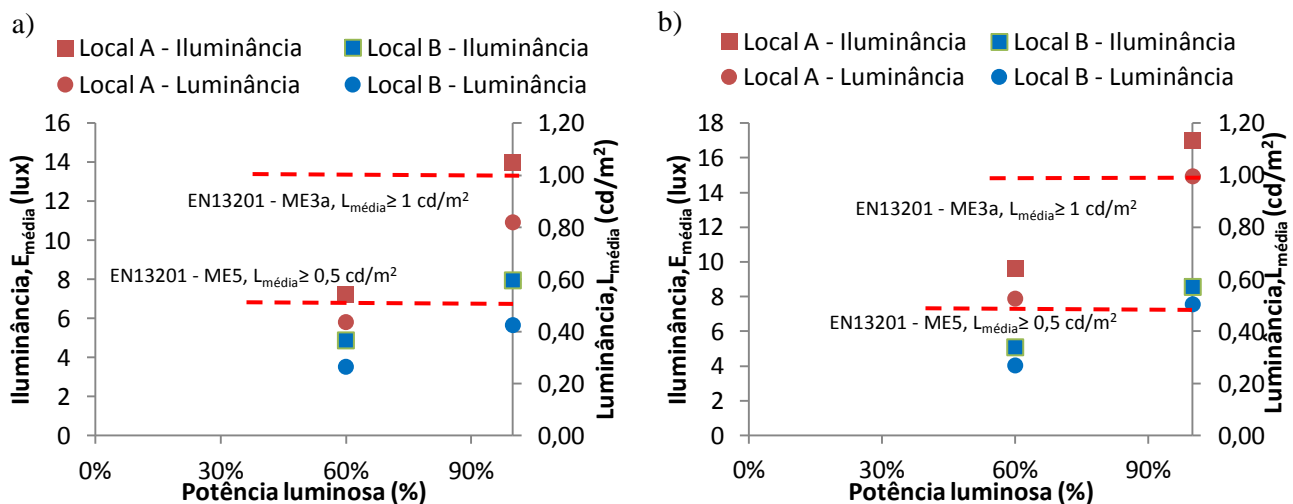


Figura 60 – a) Valor de iluminância e luminância nos Locais A e B com a tecnologia VSAP_b*, considerando a potência nominal das luminárias, 100% e redução para 60%. b) Valor de iluminância e luminância nos Locais A e B com a tecnologia VSAP_b e colunas de iluminação de 11m, considerando a potência nominal das luminárias, 100% e redução para 60%. Os quadrados correspondem a valores de iluminância e os círculos a valores de luminância. A cor vermelha corresponde ao Local A e a azul ao Local B.

A Figura 60 a) mostra que tanto o Local A como o Local B não apresentam os requisitos fotométricos impostos pela classe de iluminação ME3a quando o sistema de iluminação VSAP_b* se encontra à potência nominal. Quando é reduzido a potência luminosa para 60% no período de iluminação em que a classificação de iluminação é ME5, Δt_2 , apenas a iluminância do Local A está de acordo com os 7,5 lux presente na recomendação CIE115:2010 para a classe ME5. No entanto, a luminância no Local A não cumpre o valor normalizado pela norma EN13201. Assim, com a atual disposição no local e características das luminárias, a potência das lâmpadas e tecnologia VSAP_b* não permite cumprir a norma para os Locais A e B. Logo não é recomendado que se instalem os balastros eletrónicos para reduzir a potência luminosa durante os períodos de baixo fluxo automobilísticos porque, mesmo alterando a classe de iluminação de ME3a para ME5, o sistema de iluminação continua a não cumprir os valores normalizados.

A Figura 60 b) mostra que o Local A com a tecnologia de iluminação VSAP_b e altura da coluna de iluminação reduzida para 11m tanto cumpre as exigências fotométricas da classe de iluminação ME3a nos períodos Δt_1 e Δt_3 como cumpre as exigências da classe ME5 no período Δt_2 em que o sistema de iluminação funciona com potência luminosa reduzida a 60%. O mesmo sistema de iluminação instalado no Local B, como a interdistância entre as colunas de iluminação é de 90m, não consegue mais uma vez cumprir a norma em nenhum dos períodos de iluminação definidos, quer esteja a funcionar à potência nominal ou à potência reduzida. Entretanto, caso a luminária colocada aos 45m estivesse ligada, o sistema de iluminação conseguiria cumprir os valores fotométricos exigidos pelas classes de iluminação ME3a e ME5 porque a distância transversal do troço Local B é inferior à do Local A.

A Tabela 23 mostra as poupanças obtidas com a utilização dos balastros eletrónicos no sistema de iluminação com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (VSAP) considerando os perfis de funcionamento da iluminação durante o período de Inverno e Verão.²³

Tabela 23 – Cálculo da poupança obtida com a implementação de balastros eletrónicos.

	Sistema de iluminação VSAP_b* com balastros eletrónicos
Potência instalada com balastro ferromagnético (kW)	8,9
Potência instalada com balastro eletrónico (kW) ²⁴	8,0
Potência instalada reduzida (kW) ²⁵	4,8
Número de horas totais em funcionamento por ano (h/ano)	4013
Horas de redução de fluxo, 60%, no Inverno (h/ano)	1547
Horas de redução de fluxo, 60%, no Verão (h/ano)	1281
Consumo total de energia ativa no período 100% (MWh/ano)	9,5
Consumo total de energia ativa no período 60% (MWh/ano)	13,6
Consumo total de energia ativa total (MWh/ano)	23,1
Poupança de energia ativa obtida (MWh/ano)	12,7
Emissões evitadas de CO ₂ (ton CO ₂ e/ano) ²⁶	6,0
Percentagem de poupança anual obtida na iluminação de auto-estrada (%)	35,5%

Constatou-se que apenas com a utilização de balastros eletrónicos no sistema de iluminação da auto-estrada Évora Poente se consegue uma poupança anual de energia ativa de 12,7MWh, 10,3% do consumo de energia total proveniente do sistema de iluminação do Nó de Évora Poente. Esta poupança apenas considera as luminárias que estão ligadas.

- **Cenário 2 – Substituição por armaduras LED com regulador de fluxo luminoso**

Uma vez que, com uma periodicidade de 9 anos, é feita pela concessionária uma substituição das armaduras, justifica-se o estudo da viabilidade de utilização de armaduras LED. Para tal efetuou-se um estudo semelhante ao anterior substituindo as armaduras com lâmpadas VSAP por armaduras com módulos LED.

De forma a obter valores estimados da simulação desta substituição, consideraram-se as luminárias LED_a e LED_b presentes na

Tabela 24, cujas características se encontram no Anexo XI – Curvas de distribuição da intensidade luminosa (cd) da luminária LED_a e LED_b, admitindo que se encontram instaladas nos Locais A e B.

²³ A estas poupanças devem ainda somar-se as que decorrem da correção do fator de potência. Não foi possível estimar esta contribuição uma vez que a medição da potência reativa efetuada se refere à totalidade do sistema de iluminação (incluindo o nó da nacional). Para o poder fazer, teria sido necessário medir a potência reativa associada exclusivamente aos pontos de luz em estudo.

²⁴ Considera a redução das perdas do balastro ferromagnético (20W e 27W)

²⁵ Considera a redução das perdas do balastro ferromagnético (20W e 27W) e os 60% do balastro eletrónico.

²⁶ Fator de emissão da eletricidade 0,470 kg CO₂/kWh – Portaria 63/2008

Tabela 24 – Características das luminárias utilizadas para remodelação do sistema de iluminação presente no Nó de Évora Poente auto-estrada. [46] O estudo luminotécnico incidiu nos Locais A e B.

Tecnologia de iluminação	Fabricante da luminária	Família do Produto	Modelo	Potência da luminária (W)	Fluxo luminoso da luminária (lm)	Eficácia da luminária (lm/W)	CCT (K)	CRI	Fator de manutenção global
LED_a	Beta LED	LEDway	STR-LWY-2S-12-D-UL-700-43K	271	19643	72,5	4300	70	0,88
LED_b	Philips	SpeedStar BGP323 T35	ECO269-2S/740 DW	251,5	22332	88,8	4000	70	0,88

A Figura 61 mostra os perfis de distribuição da iluminância obtidos com luminárias LED_a e LED_b no pavimento dos Locais A e B, mantendo a atual altura e interdistância das colunas.

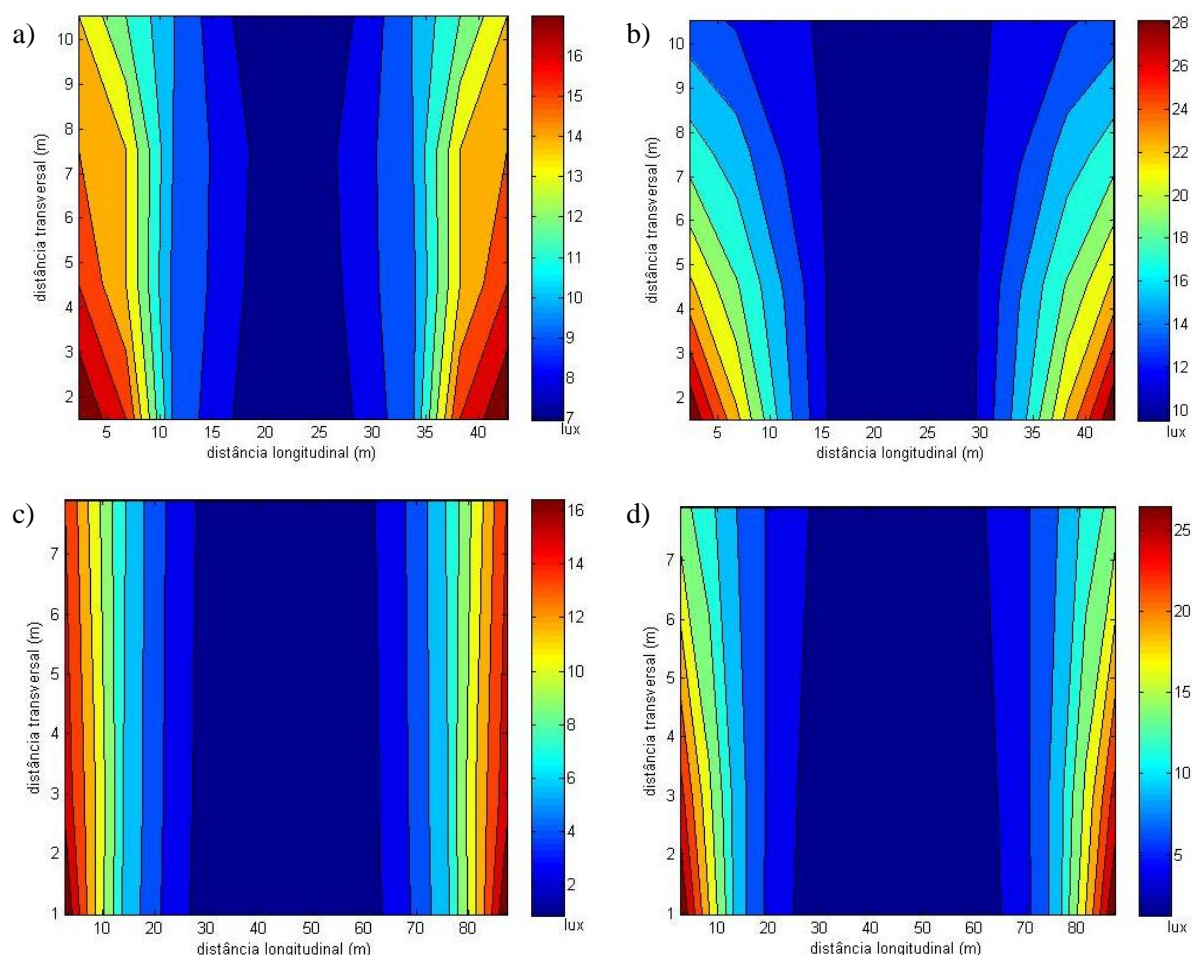


Figura 61 – Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local A: a) LED_a e b) LED_b. Gráfico de distribuição da iluminância (lux) estimada pelo DIALux no troço de auto-estrada, Local B: c) LED_a e d) LED_b

A Figura 61 permite evidenciar que entre os 15m e os 30m no Local A o nível de iluminância é muito reduzido (da ordem de 7lux) obtendo-se assim um contraste luminoso elevado. Este efeito é ainda maior No Local B, gráficos c) e d), dada a interdistância existente por eliminação de luminárias.

A Tabela 25 mostra os resultados luminotécnicos obtidos com a simulação das luminárias LED_a e LED_b para os Locais A e B no DIALux. A iluminância média foi obtida dos valores do perfil de distribuição da Figura 61.

Tabela 25 – Caracterização fotométrica do Local A e B através do DIALux proporcionada pelas luminárias LED_a e LED_b. Comparação com os valores requeridos pela classe de iluminação ME3a.

Local	Método de cálculo	Iluminância média, $E_{médio}$ (lux)	Luminância média, $L_{médio}$ (cd/m ²)		Uniformidade Global, U_o	Uniformidade Longitudinal, U_L	Encadeamento perturbador, TI (%)	Iluminação Envolvente
	Valor normalizado, M3a (EN13201)	15	≥ 1		$\geq 0,4$	$\geq 0,7$	≤ 15	0,5
A	Cálculo DIALux, LED_a	11	Via de trânsito da Esquerda	0,76	0,59	0,95	6	-----
			Via de trânsito Central	0,7	0,6	0,84	9	-----
			Via de trânsito da Direita	0,61	0,65	0,82	11	-----
	Cálculo DIALux, LED_b	15	Via de trânsito da Esquerda	1,01	0,49	0,74	7	-----
			Via de trânsito Central	0,92	0,52	0,91	10	-----
			Via de trânsito da Direita	0,82	0,58	0,88	12	-----
B	Cálculo DIALux, LED_a	5,6	Faixa de rodagem oposta	0,27	0,44	0,27	14	-----
		5,9	Faixa de rodagem da Luminária	0,43	0,38	0,26	13	-----
	Cálculo DIALux, LED_b	6,7	Faixa de rodagem oposta	0,34	0,48	0,33	20	-----
		8,7	Faixa de rodagem da Luminária	0,6	0,29	0,19	15	-----

A luminária LED_b aplicada ao Local A é a que está mais próxima de preencher todos os requisitos da classe de iluminação ME3a, embora nas vias de trânsito da direita e central o valor da luminância seja inferior a 1 cd/m². Esta caracterização da luminância por vias é importante no sentido em que a circulação automóvel é feita nessas três vias e é importante saber a perceção da luminosidade emitida pelo pavimento por parte do condutor. Percebe-se que distanciar as luminárias 90m uma da outra, Local B, diminui bastante a uniformidade global e longitudinal para valores inferiores aos normalizados e aumenta o encadeamento para valores próximos do normalizado, para uma estrada com classe de iluminação ME3a. Mais uma vez constata-se que as luminárias com potência de 250W, colocadas à altura original (12m) não produzem um fluxo luminoso suficiente para se obterem os 15 lux (1cd/m²) no pavimento porque a localização das mesmas e a morfologia da luminária (altura, comprimento de braço, óptica) são fatores limitantes. No entanto, a luminária LED_b para o Local A e B seria a melhor opção.

Tal como anteriormente estudou-se igualmente a possibilidade de diminuição da altura dos postes associada à alteração para armaduras LED. A Figura 62 mostra qual a altura ótima das luminárias para que o troço em estudo pudesse satisfazer os requisitos impostos pela norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a. É apenas realizado o estudo para o Local A, porque o Local B apresenta valores muito afastados dos normalizados, o que levava a estudar para além da variação da altura dos postes também a interdistância entre os mesmos. Esta variação da interdistância entre os postes de iluminação não foi estudada, porque requeria o dimensionamento de um sistema de iluminação de raiz envolvendo custos insuportáveis e possivelmente, não seriam obtidas quaisquer poupanças energéticas porque ao diminuir-se a interdistância entre os postes de iluminação e a potência instalada de cada lâmpada

seria necessário instalar mais postes de iluminação para satisfazer as necessidades de segurança e conforto dos utilizadores.

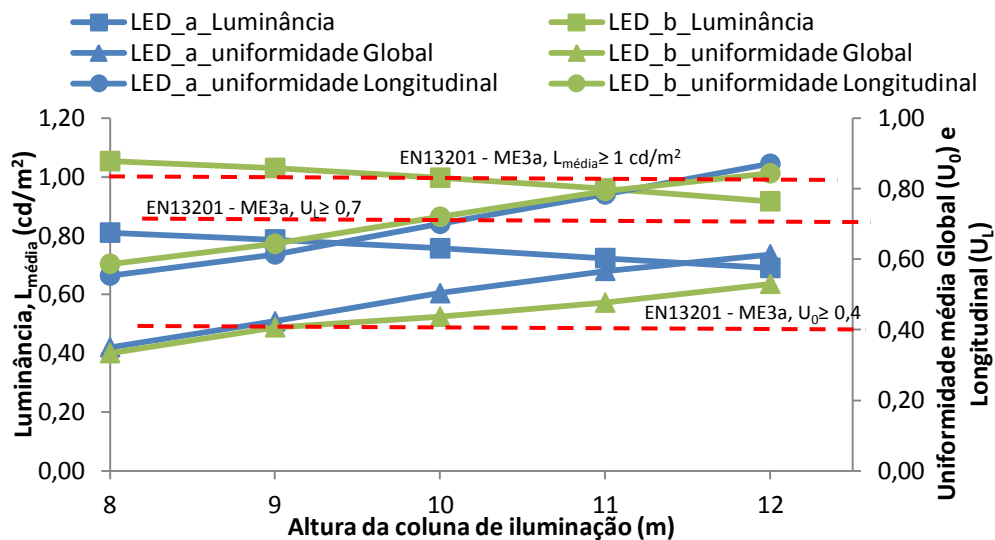


Figura 62 – Variação da luminância, uniformidade global e uniformidade longitudinal com altura do poste onde está instalada a armadura LED_a e LED_b. O local considerado é o Local A.

A Figura 62 mostra que a luminária LED_b com uma altura de poste de 10m e a funcionar à sua potência nominal consegue cumprir os requisitos da norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a. A luminária LED_a, se não for possível alterar a interdistância entre os postes de iluminação, não é recomendada para substituir a armadura VSAP porque entre os 8m e 12m de altura do poste de iluminação nunca consegue cumprir simultaneamente os três valores requeridos pela norma para a classe ME3a.

À semelhança do que foi feito anteriormente, de forma a potencializar as vantagens das luminárias LED, considerou-se a instalação de um sistema de regulação, *Regulação programável com Dynadimmer*, Anexo XII – *Driver Integrated Dynadimmer Philips* para luminárias LED, que permite reduzir o fluxo luminoso em função do fluxo automobilístico. Os subperíodos de iluminação considerados são os mesmos que foram abordados anteriormente, o que apenas muda é a versatilidade das luminárias LED, que têm a capacidade de diminuir a percentagem de potência luminosa num período de 100% para até 10% de uma forma instantânea.

Para o cálculo das poupanças obtidas pelas luminárias LED com redutores de fluxo luminoso, admitiram-se 5 passos de redução do fluxo luminoso para a época de Inverno e Verão através do comportamento anual do fluxo automobilístico e que estão representados na Figura 63 e Figura 64. Estes 5 passos são assegurados pelo tipo de regulação – *Dynadimmer (Philips)*.

Assim, no período de Inverno, Figura 63, o subperíodo Δt_2 corresponde à redução da potência luminosa do período de iluminação depois da hora de maior fluxo automobilístico até ao desligar do sistema de iluminação (22:00h – 7:00h). Tal como para a tecnologia de iluminação VSAP, a classe de iluminação é ME5. Durante esse período de redução da potência luminosa, o sistema de iluminação está a: i) 70% das 22h-23h; ii) 50% das 23h-2h; iii) 10% das 2h-6h; iv) 50% das 6h-7h.

No período de Verão, Figura 64, o subperíodo Δt_2 é igual ao do Inverno só que inicia às 23h e termina às 6h. Durante esse período de redução da potência luminosa, o sistema de iluminação está a: i) 70% das 23h-00h; ii) 50% das 00h-3h; iii) 10% das 3h-5h; iv) 50% das 5h-6h.

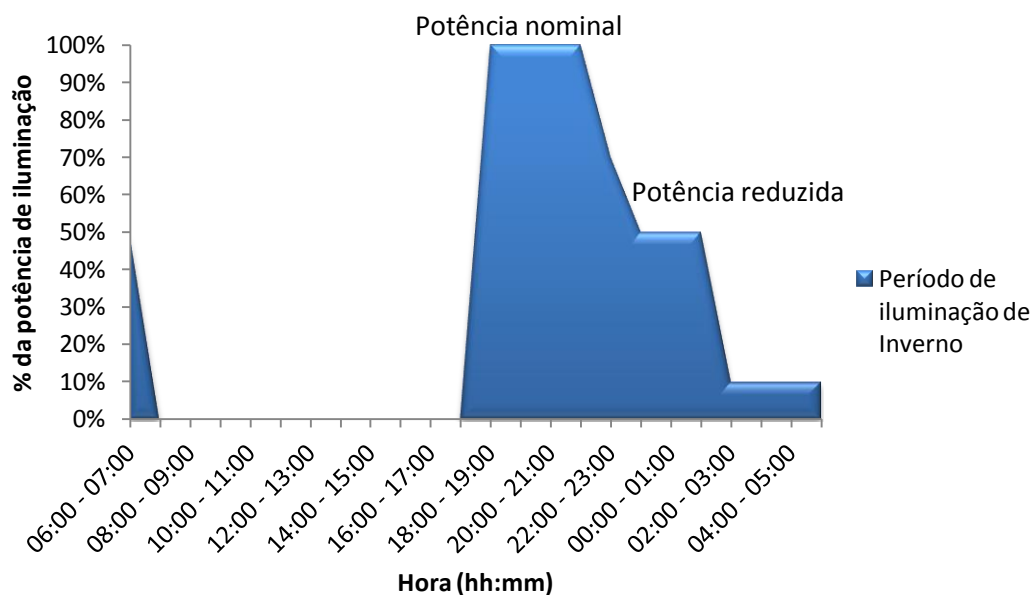


Figura 63 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Inverno após a implementação de luminárias LED com driver regulador de fluxo.

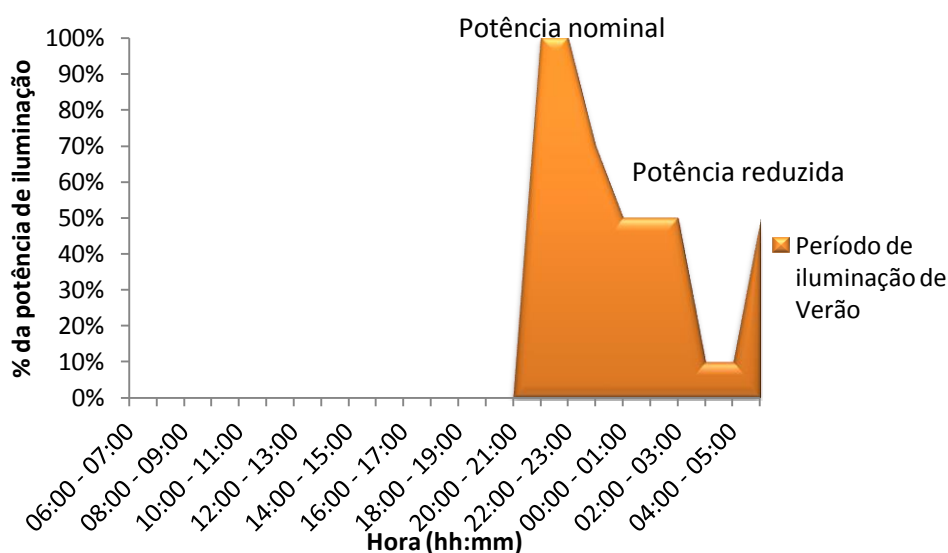


Figura 64 – Impacto no horário e na percentagem de potência de iluminação no período de Verão após a implementação de luminárias LED com driver regulador de fluxo.

De uma forma resumida, a Figura 65 mostra a variação do nível de iluminância e luminância por redução da potência luminosa para cada tecnologia LED instalada no Locais A e B na situação anteriormente referida de uma altura de poste de 10m.

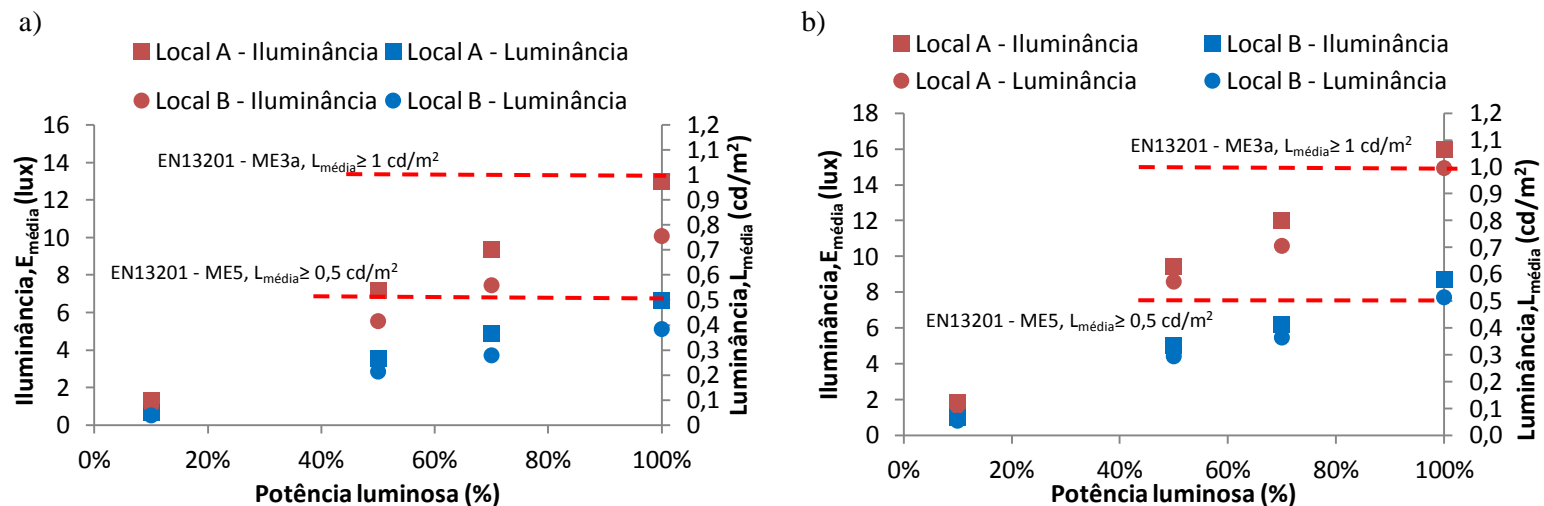


Figura 65 – Valores de iluminância e luminância nos Locais A e B com as tecnologias, a) LED_a, b) LED_b, instaladas considerando a potência nominal das luminárias, 100%, redução para 70%, 50% e 10% na tecnologia LED. A altura da coluna de iluminação de ambas as luminárias é de 10m. Os quadrados indicam os valores de iluminância, os círculos indicam valores de luminância, a cor vermelha indica o Local A e a azul o Local B.

Verificou-se pela Figura 65 a) que a implementação de um sistema de redução de fluxo vai diminuir os valores de iluminância e luminância para valores inferiores aos normalizados para a classe de iluminação ME3a. Entretanto, nos períodos de redução da iluminação em que a classe de iluminação é ME5, Δt_2 , entende-se que a luminária LED_a só consegue cumprir a norma no Local A se a redução da potência luminosa for inferior ou igual 30%. No Local B, os valores fotométricos obtidos com a luminária LED_b não cumprem nunca as exigências impostas pela classe de iluminação ME3a e ME5, o que mostra mais uma vez que a interdistância de 90m entre luminárias impossibilita o cumprimento da norma EN13201.

Na Figura 65 b), para o Local A, a luminária LED_b cumpre os requisitos impostos pela classe de iluminação ME3a, período de iluminação Δt_1 , e apenas cumpre os requisitos impostos pela classe de iluminação ME5, período de iluminação Δt_2 , se a redução de potência luminosa for inferior ou igual a 50%. A redução de potência luminosa para valores inferiores a 50% só pode ser considerada caso o sistema de iluminação tenha instalado um sistema de controlo inteligente de iluminação, que permita retomar os níveis de potência luminosa em conformidade com a norma sempre que existe fluxo automobilístico. Nesta situação poderia mesmo pensar-se na hipótese de baixar a intensidade luminosa para um nível de “sinalização de presença” da via (10%), o que permitiria provavelmente ganhos significativos.

Para o Local B, a redução da potência luminosa da luminária LED_b faz com que nunca sejam cumpridos os valores normalizados pela classe de iluminação ME5. Mais uma vez devido à interdistância entre as luminárias, a luminária LED_b a funcionar à sua potência nominal também não cumpre os requisitos da classe de iluminação ME3a.

A tecnologia LED_b instalada no Local A com uma redução da potência luminosa até 50% é recomendada como solução para remodelação do sistema atual de iluminação porque cumpre os valores normalizados exigidos pela classe de iluminação ME3a e ME5. No entanto, como veremos a propósito da análise económica, os custos deste tipo de luminárias são ainda demasiado elevados, o que se traduzirá num tempo de retorno de investimento acima do razoável.

A Tabela 26 mostra as poupanças obtidas com a remodelação do sistema VSAP instalado, com potência instalada nominal de 8,9kW, por luminárias LED com redução de fluxo.

Tabela 26 – Cálculo da poupança obtida com a implementação de luminárias LED com regulação de fluxo luminoso.

	Sistema de iluminação LED_a com sistema <i>dimming</i>	Sistema de iluminação LED_b com sistema <i>dimming</i>
Potência instalada (kW)	8,6	8,0
Número de horas totais em funcionamento por ano (h/ano)	4013	
Horas de redução de fluxo no Inverno (h/ano)	1638	
70%	182	
50%	728	
10%	728	
Horas de redução de fluxo no Verão (h/ano)	1281	
70%	183	
50%	732	
10%	366	
Consumo total de energia ativa no período 100% (MWh/ano)	9,3	8,8
Consumo total de energia ativa no período de redução (MWh/ano)	9,4	8,8
Consumo total de energia ativa total (MWh/ano)	18,7	17,6
Poupança de energia ativa obtida (MWh/ano)	17,0	18,1
Emissões evitadas de CO ₂ (ton CO ₂ e/ano)	8,0	8,5
Percentagem de poupança anual obtida na iluminação de auto-estrada (%)	47,6	50,7

Através da Tabela 26 percebe-se que os 15% de poupança obtida com tecnologia LED com sistema *dimming* comparativamente com a tecnologia VSAP com balastro eletrónico deve-se à capacidade das luminárias LED poderem ser reguladas numa maior gama de redução da sua potência luminosa ao contrário do limite de 60% das lâmpadas VSAP. Só com os módulos LED instalados não se obtêm qualquer poupança porque numa remodelação apenas se substitui as armaduras mantendo-se o poste com a mesma configuração e no mesmo local. Acontece que para se obter um iluminância no pavimento de 15lux (1cd/m²) os módulos LED têm de ter valores de fluxo luminoso nominais superiores a 20 000 lumens, o que corresponde, para as tecnologias actuais, a uma potência de módulo de aproximadamente 250W. O fator que explica esta situação é a eficácia luminosa (lm/W) da luminária VSAP_b ser superior à eficácia luminosa da tecnologia actual do módulo LED_a e próxima à da luminária LED_b. Considerando o cumprimento da norma pelo sistema de iluminação LED_b e este apresentasse um sistema de redução inteligente de fluxo instalado seria possível alcançar poupanças na ordem dos 51%.

Sem o sistema de redução de fluxo inteligente e considerando que o sistema de iluminação LED_b durante os períodos de redução funciona a 50% da potência luminosa, a poupança anual obtida na iluminação de auto-estrada é de aproximadamente 42,5% correspondente a 15,2MWh/ano como mostra a Tabela 27.

Tabela 27 – Cálculo da poupança obtida com a implementação de luminárias LED com regulação de fluxo luminoso limitado a 50% de redução da potência luminosa.

	Sistema de iluminação LED_a com sistema <i>dimming</i>	Sistema de iluminação LED_b com sistema <i>dimming</i>
Potência instalada (kW)	8,6	8,0
Número de horas totais em funcionamento por ano (h/ano)	4013	
Horas de redução de fluxo no Inverno (h/ano)	1638	
50%	1638	
Horas de redução de fluxo no Verão (h/ano)	1281	
50%	1281	
Consumo total de energia ativa no período 100% (MWh/ano)	9,3	8,8
Consumo total de energia ativa no período de redução (MWh/ano)	12,5	11,7
Consumo total de energia ativa total (MWh/ano)	21,8	20,5
Poupança de energia ativa obtida (MWh/ano)	13,9	15,2
Emissões evitadas de CO ₂ (ton CO ₂ e/ano)	6,5	7,1
Percentagem de poupança anual obtida na iluminação de auto-estrada (%)	38,9%	42,5%

Na ótica financeira de um processo de remodelação, Tabela 28, no investimento inicial no caso da luminária VSAP_b*considerou-se apenas o custo da armadura e da primeira lâmpada, 350 €/unid, para as 36 luminárias em funcionamento. Os balastros eletrónicos acrescentam um custo de 70€/unid [34] para luminárias com lâmpadas de 150W e 90€/unid [34] para luminárias com lâmpadas de 250W. No caso das luminárias LED, considerou-se como investimento inicial, para a luminária Philips e Beta LED, o custo das 36 luminárias,1700€/unid [47], mais o custo do driver regulador, 95€/unid [47].

Tabela 28 – Payback simples para as medidas de eficiência energética estudadas.

	Luminária LED_a + sistema <i>dimming</i>	Luminária LED_b + sistema <i>dimming</i>	Luminária VSAP_b* + balastros eletrónicos	Luminária VSAP_b*
Investimento inicial total (€)	59 620	58 610	15 640	12 600
Custo total da energia ativa consumida (€/ano)	1655,0	1557,6	2040,3	3161,6
Energia consumida (MWh/ano)	18,7	17,6	23,1	35,7
Tarifa média do consumo electricidade (€/MWh)	63,3	63,3	63,3	63,3
Tarifa de acesso à rede (€/MWh)	25,2	25,2	25,2	25,2
Poupanças anuais (€/ano)	1506,6	1603,9	1121,24	-----
Payback simples (anos)	39,6	36,5	13,9*	-----

*2,7 anos de payback apenas para os balastros eletrónicos

Constatou-se que, dados os elevados custos deste tipo de luminárias, o *Payback* simples de uma remodelação para armadura LED é muito superior às suas 100 000h úteis de vida média (25 anos a funcionar 4013h/ano, de tempo de vida para 80% do fluxo luminoso). O *Payback* simples aumenta para 48 anos para a luminária LED_a e 43 anos para a luminária LED_b se o regulador de fluxo for limitado a 50% de redução de potência luminosa. Numa remodelação de armadura VSAP por outra armadura igual mas com balastros eletrónicos implementados obtêm-se um *payback* de aproximadamente de 14 anos, não esquecendo, apesar de não ser contabilizado, que aos 4,7 anos (19 000h) a lâmpada VSAP já tem 10% de probabilidade de falhar. No entanto, se apenas se realizar uma troca de balastro ferromagnético por eletrónico consegue-se recuperar o investimento em 2,7 anos. Em nenhum destes cálculos foi considerado o retorno correspondente à correção do facto de potência, nem o custo de alteração da altura das colunas.

7. Conclusões

O trabalho apresenta um estudo sobre o desempenho energético, luminotécnico e económico dos sistemas de iluminação instalados em auto-estradas e respetiva análise de propostas de remodelação de forma a alcançar uma maior eficiência energética e diminuição de custos de operação. O objeto de estudo foi o sistema de iluminação do Nó de Évora Poente da auto-estrada A6 concessionada à Brisa Auto-Estradas de Portugal, S.A..

Fez-se um levantamento das cargas consumidoras dos “Nós” da auto-estrada A6 e analisaram-se os respetivos consumos energéticos do ano de 2011 bem como a evolução do tráfego médio diário mensal entre 2008-2011. Selecionou-se como objeto de estudo o Nó de Évora Poente devido: *i)* ao baixo registo mensal de entradas e saídas na Portagem; *ii)* à simplicidade da topologia do Nó; *iii)* ao facto de ser um dos principais acessos à cidade de Évora, considerada uma cidade inteligente; e *iv)* à possibilidade de realização de medições *in situ*.

Enquadraram-se o desempenho fotométrico do sistema de iluminação instalado com os requisitos da norma europeia EN13201, através de dados medidos e estimados dos Locais A e B com morfologia de estrada diferentes. A metodologia usada para a medição dos dados, fotométricos e elétricos, foi a proposta pela norma EN13201-3 e EN13201-4, enquanto a ferramenta usada para estimar os dados fotométricos foi o DIALux, utilizado na simulação fotométrica dos Locais A e B. Para terminar o estudo do desempenho da iluminação rodoviária instalada, analisou-se a tecnologia das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão numa ótica de avaliar a sua eficácia luminosa e desempenho perante os dois tipos de visão humana (fotópica e escotópica) e fez-se a análise do custo do ciclo de vida do sistema de iluminação segundo o método sugerido pela recomendação CIE115:2010.

Após a realização de uma análise do sistema de iluminação instalado, estudaram-se diferentes possíveis soluções para aumentar a sua eficiência energética: a variação da altura dos postes, o impacto da substituição de balastros ferromagnéticos por eletrónicos e a substituição das armaduras de vapor de sódio de alta pressão por armaduras de módulos LED com reguladores de potência luminosa. Relativamente a cada um dos casos, utilizaram-se a simulação em DIALux para efetuar: *i)* a análise da conformidade com o disposto na norma EN13201; *ii)* a criação de subperíodos de iluminação em função dos períodos de tráfego reduzido nos termos previstos na recomendação técnica CIE115:2010. Relativamente a cada um dos cenários foi feita uma análise financeira, através do *payback* simples.

Da análise efetuada ao sistema de iluminação presente na auto-estrada do Nó de Évora Poente, A6, e às medidas de eficiência energética estudadas, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A rede elétrica do Nó de Évora Poente tem características instáveis (elevado desequilíbrio das fases) durante o período em que o sistema de iluminação está desligado, correspondente a 11h no Inverno e 15h no Verão. Esta instabilidade pode ser a causa do aumento dos custos de manutenção e operação dos sistemas de iluminação. Salienta-se a elevada componente de potência reativa durante o período em que a iluminação se encontra ligada, e o grande desequilíbrio de cargas durante o período sem iluminação ligada.
- Verifica-se um baixo tráfego médio diário mensal, o que acarreta elevados custos de operação e manutenção (o que está na base do encerramento de luminárias feito pela concessionária).
- A iluminação tem um peso de 69% e 65% no consumo de energia ativa e reativa do Nó, correspondente a um valor estimado de 120MWh e 51MVarh em 2012, respectivamente. A principal causa deste consumo de energia reativa e do baixo fator de potência da rede elétrica parece ser a utilização de balastros ferromagnéticos, devido ao seu baixo fator de potência (0,87).
- As luminárias instaladas no local apresentam um desempenho dentro do esperado tendo em atenção a data de início da sua utilização estando, portanto, em boas condições.

- O sistema de iluminação presente na auto-estrada não satisfaz os requisitos da norma EN13201, para a classe ME3a, no que diz respeito a valores de iluminância e luminância. Este aspeto verifica-se tanto no Local A, que apresenta uma faixa de rodagem com três vias de trânsito, como no Local B, que apresenta duas faixas de rodagem com uma via de trânsito cada. A situação é mais grave no caso do local B pelo facto de terem sido suprimidas luminárias. O índice de eficiência energética é em ambos os locais de classe G (DRREIP).
- No caso do Local B, o facto de existirem luminárias distanciadas entre si 90m em apenas uma das laterais da estrada, abrangendo um comprimento transversal superior a 12m, origina “zonas sombra” que diminuem a perceção do condutor relativamente a possíveis obstáculos que estejam naquele local, o que pode diminuir o tempo de reação necessário para os evitar em segurança. Os gráficos de distribuição da iluminância no pavimento representam com clareza a área “sombra” com valores de iluminância na ordem de 1/5 do valor normalizado.

Contudo, sugerem-se as seguintes recomendações com o objetivo de tornar o sistema de iluminação para auto-estrada A6 mais eficiente:

- A utilização de balastros eletrónicos no sistema de iluminação de auto-estrada permitirá obter poupanças de energia ativa na ordem dos 35% com um período de retorno de apenas 2,7anos, e, ainda, ganhos não contabilizando associados à correção do fator de potência. Salienta-se, no entanto, que estas poupanças de 35% são obtidas utilizando a possibilidade de redução da iluminação em função da diminuição do tráfego prevista na recomendação CIE115:2010, que contraria o disposto na norma EN13201. Esta poupança energética permite evitar a emissão de cerca de 6 toneladas de CO₂ para a atmosfera por ano.
- A eficiência energética obtida com a implementação da tecnologia LED deveu-se à capacidade dos drivers permitirem variar a potência luminosa da luminária na gama 10-100% porque a potência do módulo LED necessária para ter aproximadamente 15 lux (1cd/m²) no pavimento é a mesma que a luminária com tecnologia VSAP necessita. Mais uma vez, como os postes de iluminação não podem ser mudados de sítio, os problemas de localização e organização geográfica do sistema de iluminação são uma barreira à eficiência energética na iluminação rodoviária de auto-estrada em locais interurbanos. Entretanto, a luminária LED_b cumpre os valores normalizados de luminância, uniformidade global e longitudinal da norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a e ME5 se for considerada uma redução de potência igual ou inferior a 50%.
- Com a regulação do fluxo luminoso, associado a um sistema inteligente de controlo capaz de detetar a existência de tráfego, a luminária LED_b conseguiria cumprir a norma e ter poupanças na ordem dos 51%. Caso não seja usado um sistema inteligente de controlo e haja cumprimento das exigências das classes de iluminação ME3a e ME5 a instalação das luminárias LED_b com regulador de fluxo limitado a 50% de redução de potência luminosa no Local A apenas consegue ter uma poupança de 43%.No entanto, dado o elevado custo atual deste tipo de luminárias, a remodelação das armaduras VSAP por LEDs levaria a um período de retorno acima dos 40 anos. Esta poupança energética permite evitar a emissão de aproximadamente 7 toneladas de CO₂ para a atmosfera por ano. Realçou-se que quanto maior for a regulação do fluxo, mais se afastam os valores de iluminância e luminância dos valores normalizados. A tecnologia LED tem de ser avaliada caso a caso, porque este estudo mostra que as luminárias LED não servem todas as necessidades.
- Durante a remodelação do sistema de iluminação de VSAP para LED_b, no Local A, é necessário diminuir a altura do poste da luminária para 10m e limitar a redução de potência a 50% para que o sistema de iluminação consiga cumprir os valores normalizados pela norma EN13201 para a classe de iluminação ME3a e ME5 durante os períodos de iluminação definidos.

- A tecnologia de iluminação de vapor de sódio de alta pressão, *MASTER SON-T PIA Plus: Philips*, associada a um balastro eletrónico e uma luminária com fator de manutenção superior a 0,8 é a opção tecnológica com a melhor rentabilidade, viabilidade e perfeitamente adaptada às necessidades de iluminação na auto-estrada.

No âmbito do estudo, verificou-se que a estratégia para alcançar poupanças no consumo do sistema de iluminação do Nó de auto-estrada é agir em primeira instância na resolução da instabilidade da rede elétrica no que toca à qualidade da energia distribuída no local. Para isto ser possível, é necessário um gestor local de energia que fosse responsável pela verificação e monitorização do desempenho de toda a rede elétrica dos respetivos “Nós” e pelo tratamento e organização dos dados para futuras comparações e verificação de possíveis erros.

Contudo, o trabalho realizado apresenta algumas limitações e ponto fracos que no futuro podem vir a ser melhorados:

- O estudo da conformidade com a norma EN13201 deve ser feito antes da entrada em funcionamento da auto-estrada ao público, porque é completamente impossível para as concessionárias fecharem as vias de trânsito para que seja possível fazer as medições. Estes procedimentos trariam custos avultados à concessionária. Assim, as medidas fotométricas de iluminância apresentam um grau de imprecisão elevado para além de que não foi possível medir a luminância devido à inexistência do equipamento adequado. Não foi possível seguir rigorosamente a metodologia disponibilizada pela norma EN13201-3 e EN13201-4.
- O estudo não permitiu contabilizar a percentagem de consumo de energia reativa associada exclusivamente ao sistema de iluminação da auto-estrada. Seria interessante avaliar o desempenho de uma luminária individual em funcionamento.
- O facto de haver um único quadro eléctrico para fazer a distribuição para todas as cargas do Nó não permitiu o foco no consumo apenas proveniente do sistema de iluminação do Nó de auto-estrada.
- A falta de dados económicos para aplicação com precisão do método de cálculo do custo do ciclo de vida sugerido pela recomendação CIE115:2010.
- A inexistência dos ficheiros IES para o DIALux da luminária HADASA M-250 e da lâmpada *MASTER SON-T PIA Hg-Free: Philips*.
- O método de cálculo do período de retorno das medidas de eficiência propostas foi demasiado simplificado e não considerou os custos de manutenção e variáveis financeiras ou descontos de aquisição de grandes quantidades.

Este projeto apresenta assuntos que podem ser aprofundados e serve de introdução a alguns temas que são relevantes para a continuação do estudo sobre a importância de um sistema de iluminação eficiente para a eficiência energética dos “Nós” de auto-estrada. Assim, ficam aqui algumas sugestões:

- Investigar o desempenho da aplicação de um sistema de controlo e monitorização remoto, permitindo de uma forma inteligente gerir os consumos do sistema de iluminação de forma individual, luminária a luminária, e poder reduzir o fluxo luminoso com a variação do fluxo automobilístico, o que permitiria tirar um maior partido das luminárias do tipo LED. Para isso, seria importante haver um sistema piloto deste género já instalado.
- Medir, analisar e estudar a qualidade da energia distribuída na rede elétrica do Nó de Évora Poente, durante um período de tempo elevado. Tentar comparar o impacto da tecnologia de alta intensidade de descarga e da tecnologia LED na rede elétrica.
- Fazer uma análise económica exaustiva e pormenorizada de um sistema de iluminação já instalado com tecnologia VSAP e de uma tecnologia LED a ser instalada.

8. Bibliografia

- [1] F. F. M. d. Santos, “PORDATA - Base de Dados Portugal Contemporâneo,” Fundação Francisco Manuel dos Santos, [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Portugal/Precos+medios+de+venda+ao+publico+dos+combustiveis+liquidos+e+gasosos+%20+Continente-1265>. [Acedido em 29 Outubro 2012].
- [2] ERSE - Entidade reguladora dos serviços energéticos, “Plano de promoção da eficiência no consumo de energia eléctrica para 2011-2012,” 2010.
- [3] E. -. E. d. P. S.A., “Concessões rodoviárias - Receitas e Despesas. Relatório do primeiro semestre de 2012.,” Gabinete de estudos DRI, Lisboa, 2012.
- [4] S. Brisa Autoestradas de Portugal, “Relatório & Contas Brisa 2011,” Brisa, S.A, Lisboa, 2011.
- [5] I. Clanton & Associates e V. T. T. Institute, “Advanced Street Lighting Technologies. Assessment Project - City of San Jose,” Clanton & Associates, Inc., San Jose, California, 2010.
- [6] N. Y. S. E. R. a. D. A. (NYSERDA), “How-to Guide to Effective Energy-Efficient Street Lighting for Planners and Engineers,” NYSERDA, New York, 2002.
- [7] C. 1. Technical Committee, “EN 13201-3, Road lighting - Part 3: Calculation of performance,” CEN, 2003.
- [8] I. E. S. o. N. A. (IESNA), The IESNA Lighting Handbook - Reference & Application, 9ª Edição ed., New Yorker, USA: IESNA, 2000.
- [9] ADENE, ANMP, CPI, E. Distribuição, O. d. Engenheiros e RNAE, “Documento de Referência para a Eficiência Energética na Iluminação Pública (DREEIP),” Lisboa, 2012.
- [10] C. 1. Technical Committee, “EN 13201-2, Road Lighting - Part 2: Performance requirements,” CEN, 2003.
- [11] C. Technical report Committee 4-44 of Division 4, “CIE 115:2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic,” CIE, Comission Internationale de L'Eclairage, 2010.
- [12] R. Dangol, “Colour Rendering Index and colour rendering of LEDs,” AALTO UNIVERSITY - SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING: Department of Electronics - Lighting Unit, Finland, 2011.
- [13] “Lamptech,” [Online]. Available: <http://www.lamptech.co.uk/Documents/SO%20Spectral.htm>. [Acedido em 17 Dezembro 2012].

- [14] J. Josefowicz e D. Ha, “Vision & Exterior Lighting: Shining Some Light on Scotopic & Photopic Lumens in Roadway Conditions,” *LED Roadway Lighting*, 2008.
- [15] E. Hecht, *Optics*, 2nd Ed., Massachusetts: Addison-Wesley, 1987.
- [16] “National Eye Institute - Health Information,” [Online]. Available: <http://www.nei.nih.gov/health/eyediagram/eyeimages3.asp>. [Acedido em 16 Novembro 2012].
- [17] G. & S. W. Wyszecki, *Colour science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [18] A. International Dark-Sky, “Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting,” International Dark-Sky Association, Washington, 2010.
- [19] P. Morante, “Mesopic Street Lighting Demonstration and Evaluation Final Report for Groton Utilities,” Lighting Research Center, Troy, New York, 2008.
- [20] A. f. S.-S. i. s. a. t. (ASSIST), “Outdoor Lighting: Visual Efficacy,” *ASSIST recommends*, vol. 6, 2009.
- [21] M. Rea, J. Bullough, J. Freyssinier e A. Bierman, “A Proposed Unified System of Photometry,” *Lighting Research and Technology*, vol. 36, pp. 85-111, 2004.
- [22] M. Eloholma, “Development of visual performance based mesopic photometry,” Helsinki University of Technology - Lighting Laboratory, Helsinki, 2005.
- [23] C. 1. Technical Committee, “CEN/TR 13201-1, Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes,” CEN, 2004.
- [24] C. 1. Technical Committee, “EN 13201-4, Road Lighting - Part 4: Methods of measuring lighting performance,” CEN, 2003.
- [25] U. A. f. I. D. (USAID) e G. o. I. (GOI), “Guidelines - Energy Efficient Street Lighting,” ECO III Project, New Delhi, 2010.
- [26] A. -. A. E. Lighting, “High Pressure Sodium Servicing guide,” Acuity Lighting Group, Georgia, 2004.
- [27] T. Ribarich, “HID-lighting-technology fundamentals,” Outubro 2010. [Online]. Available: <https://edn.com/design/power-management/4363767/HID-lighting-technology-fundamentals>. [Acedido em 28 Novembro 2012].
- [28] Lighting Research Center, “NLPIP - National Lighting Product Information Program,” Rensselaer, [Online]. Available:

- <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/mwmhl/restrikeTimes.asp>. [Acedido em 7 Abril 2013].
- [29] I. Consulting, “2005 High Intensity Discharge Lighting Technology Workshop Report,” Washington, DC, 2005.
- [30] I. Energy Agency (IEA) e E. Conservation in Buildings (ECBCS), “Lighting technologies,” em *Annex 45 Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings*, 2010.
- [31] U. D. o. E. O. o. E. E. a. R. Energy, “LED Application Series: Outdoor Area Lighting,” U.S. Department of Energy’s , U.S, 2011.
- [32] The Climate Group, “LIGHTING THE CLEAN REVOLUTION - The rise of LEDs and what it means for cities,” LEDS MAGAZINE, Londres, 2012.
- [33] Next Generation Lighting Industry Alliance and U. S. Department of Energy, “LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting,” USA, 2011.
- [34] LUMTEC, “ECOLUM EC4 - Balastros electrónicos para controlo e poupança energética para lâmpadas de sódio de alta pressão,” 2010.
- [35] The Institution of Lighting Engineers, “Remote monitoring systems: The View from the roadfaces,” *The Institution of Lighting Engineers*, pp. 26-40, Abril de 2009.
- [36] D. Paulin, “Full Cutoff Lighting: The Benefits,” *Ld+A - Illuminating Engineering Society (IES)*, p. 54, Abril 2001.
- [37] D. d. P. (DPL) e G. d. C. d. G. e. S. d. I. (GCGSI), “Relatório de Monitorização da Rede Rodoviária Nacional 2010,” Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias, IP (InIR, IP), Lisboa, Agosto de 2011.
- [38] D. d. P. (DPL) e G. d. C. d. G. e. S. d. I. (GCGSI), “Relatório de Tráfego na Rede Nacional de Auto-estradas 2010,” Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias, I.P. (InIR, I.P), Lisboa, Janeiro 2011.
- [39] “360Portugal.com virtual touring,” [Online]. Available: <http://www.360portugal.com/Distritos.Mapas/Distrito-Evora.gif>. [Acedido em 15 Novembro 2012].
- [40] R. E. Stark, “Road Surface's Reflectance - Influences Lighting Design,” 1986.
- [41] Philips, *MASTER SON-T PIA Hg-Free Lamp*, 2011.

- [42] I. Instituto de Meteorologia, “Boletim Climatológico Anual - 2011,” Instituto de Meteorologia, I.P, Lisboa, 2011.
- [43] W. P. Lapatovich e N. H. Chen, “Efficacy Limits of White Light Metal Halide Lamps,” Massachusetts, 2005.
- [44] R. Pregitzer, J. Pinto, P. Neves, L. F. Monteiro e J. L. Afonso, “Filtros Activos Paralelos para Compensação Dinâmica de Problemas de Corrente em Sistemas Monofásicos e Trifásicos,” em *XCLEEE - X Portuguese-Spanish Conference in Electrical Engineering*, Madeira (Funchal), 2007.
- [45] EDP Distribuição , “Nova Ligação em Baixa Tensão,” 2007. [Online]. Available: http://www.edp.pt/pt/particulares/apoioaocliente/ligacaorede/EDPDocs/NL_encargosusoexclusivoBT2007.pdf. [Acedido em 17 Abril 2013].
- [46] CREE, “LEDway® Streetlight Technical Documents & Specifications,” [Online]. Available: <http://www.betalighting.com/us-en/TechnicalLibrary/TechnicalDocuments/Ledway-streetlights.aspx>. [Acedido em 24 Fevereiro 2013].
- [47] Philips Iluminação, “Tabela de Iluminação Profissional,” Portugal, Abril 2012.

9. Anexos

Anexo I – Funções de Eficiência Luminosa Fotópica, $V(\lambda)$, e Eficiência Luminosa Escotópica, $V'(\lambda)$

Comprimento de onda λ (nm)	Eficiência luminosa Fotópica, $V(\lambda)$	Eficácia luminosa Fotópica (lm/W)	Eficiência luminosa Escotópica, $V'(\lambda)$	Eficácia luminosa Escotópica (lm/W)
360	3,92E-06	2,68E-03	0,00E+00	0,00E+00
365	6,97E-06	4,76E-03	0,00E+00	0,00E+00
370	1,24E-05	8,46E-03	0,00E+00	0,00E+00
375	2,20E-05	1,50E-02	0,00E+00	0,00E+00
380	3,90E-05	2,66E-02	5,89E-04	1,00E+00
385	6,40E-05	4,37E-02	1,11E-03	1,88E+00
390	1,20E-04	8,20E-02	2,21E-03	3,76E+00
395	2,17E-04	1,48E-01	4,53E-03	7,70E+00
400	3,96E-04	2,70E-01	9,29E-03	1,58E+01
405	6,40E-04	4,37E-01	1,85E-03	3,15E+00
410	1,21E-03	8,26E-01	3,48E-02	5,92E+01
415	2,18E-03	1,49E+00	6,04E-02	1,03E+02
420	4,00E-03	2,73E+00	9,66E-02	1,64E+02
425	7,30E-03	4,99E+00	1,44E-01	2,44E+02
430	1,16E-02	7,92E+00	2,00E-01	3,40E+02
435	1,68E-02	1,15E+01	2,63E-01	4,46E+02
440	2,30E-02	1,57E+01	3,28E-01	5,58E+02
445	2,98E-02	2,04E+01	3,93E-01	6,68E+02
450	3,80E-02	2,60E+01	4,55E-01	7,74E+02
455	4,80E-02	3,28E+01	5,13E-01	8,72E+02
460	6,00E-02	4,10E+01	5,67E-01	9,64E+02
465	7,39E-02	5,05E+01	6,20E-01	1,05E+03
470	9,10E-02	6,21E+01	6,76E-01	1,15E+03
475	1,13E-01	7,69E+01	7,34E-01	1,25E+03
480	1,39E-01	9,49E+01	7,93E-01	1,35E+03
485	1,69E-01	1,16E+02	8,51E-01	1,45E+03
490	2,08E-01	1,42E+02	9,04E-01	1,54E+03
495	2,59E-01	1,77E+02	9,49E-01	1,61E+03

500	3,23E-01	2,21E+02	9,82E-01	1,67E+03
505	4,07E-01	2,78E+02	9,98E-01	1,70E+03
510	5,03E-01	3,44E+02	9,97E-01	1,69E+03
515	6,08E-01	4,15E+02	9,75E-01	1,66E+03
520	7,10E-01	4,85E+02	9,35E-01	1,59E+03
525	7,93E-01	5,42E+02	8,80E-01	1,50E+03
530	8,62E-01	5,89E+02	8,11E-01	1,38E+03
535	9,15E-01	6,25E+02	7,33E-01	1,25E+03
540	9,54E-01	6,52E+02	6,50E-01	1,11E+03
545	9,80E-01	6,70E+02	5,64E-01	9,59E+02
550	9,95E-01	6,80E+02	4,81E-01	8,18E+02
555	1,00E+00	6,83E+02	4,02E-01	6,83E+02
560	9,95E-01	6,80E+02	3,29E-01	5,59E+02
565	9,79E-01	6,68E+02	2,64E-01	4,49E+02
570	9,52E-01	6,50E+02	2,08E-01	3,53E+02
575	9,15E-01	6,25E+02	1,60E-01	2,72E+02
580	8,70E-01	5,94E+02	1,21E-01	2,06E+02
585	8,16E-01	5,58E+02	8,99E-02	1,53E+02
590	7,57E-01	5,17E+02	6,55E-02	1,11E+02
595	6,95E-01	4,75E+02	4,69E-02	7,97E+01
600	6,31E-01	4,31E+02	3,32E-02	5,64E+01
605	5,67E-01	3,87E+02	2,31E-02	3,93E+01
610	5,03E-01	3,44E+02	1,59E-02	2,71E+01
615	4,41E-01	3,01E+02	1,09E-02	1,85E+01
620	3,81E-01	2,60E+02	7,37E-03	1,25E+01
625	3,21E-01	2,19E+02	4,97E-03	8,45E+00
630	2,65E-01	1,81E+02	3,34E-03	5,67E+00
635	2,17E-01	1,48E+02	2,24E-03	3,80E+00
640	1,75E-01	1,20E+02	1,50E-03	2,54E+00
645	1,38E-01	9,44E+01	1,01E-03	1,71E+00
650	1,07E-01	7,31E+01	6,77E-04	1,15E+00
655	8,16E-02	5,57E+01	4,59E-04	7,80E-01
660	6,10E-02	4,17E+01	3,13E-04	5,32E-01
665	4,46E-02	3,04E+01	2,15E-04	3,65E-01
670	3,20E-02	2,19E+01	1,48E-04	2,52E-01
675	2,32E-02	1,58E+01	1,03E-04	1,74E-01

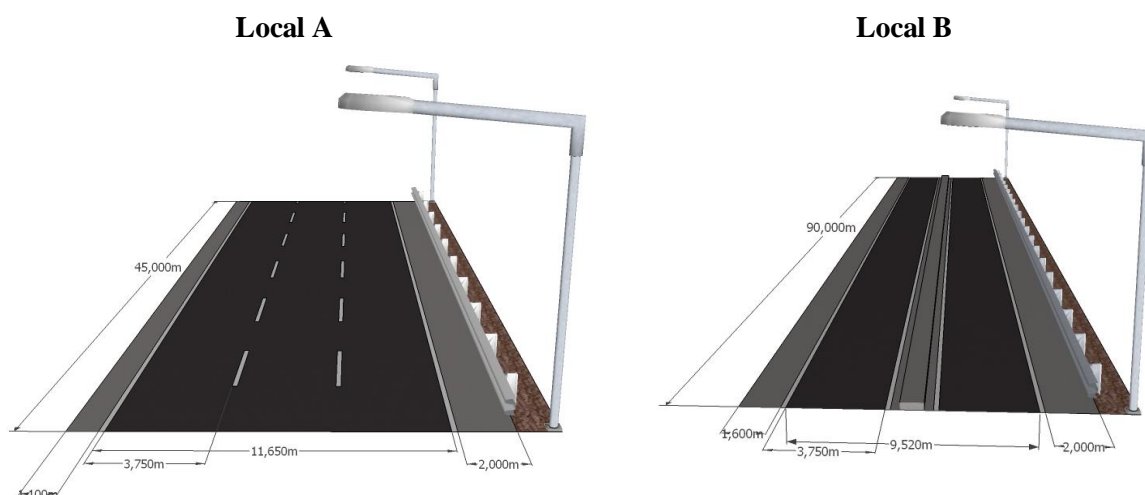
680	1,70E-02	1,16E+01	7,15E-05	1,22E-01
685	1,19E-02	8,14E+00	5,01E-05	8,52E-02
690	8,21E-03	5,61E+00	3,53E-05	6,01E-02
695	5,72E-03	3,91E+00	2,50E-05	4,25E-02
700	4,10E-03	2,80E+00	1,78E-05	3,03E-02
705	2,93E-03	2,00E+00	1,27E-05	2,16E-02
710	2,09E-03	1,43E+00	9,14E-06	1,55E-02
715	1,48E-03	1,01E+00	6,60E-06	1,12E-02
720	1,05E-03	7,15E-01	4,78E-06	8,13E-03
725	7,40E-04	5,05E-01	3,48E-06	5,92E-03
730	5,20E-04	3,55E-01	2,55E-06	4,33E-03
735	3,61E-04	2,47E-01	1,87E-06	3,18E-03
740	2,49E-04	1,70E-01	1,38E-06	2,34E-03
745	1,72E-04	1,17E-01	1,02E-06	1,74E-03
750	1,20E-04	8,20E-02	7,60E-07	1,29E-03
755	8,48E-05	5,79E-02	5,67E-07	9,64E-04
760	6,00E-05	4,10E-02	4,25E-07	7,23E-04
765	4,24E-05	2,90E-02	3,20E-07	5,43E-04
770	3,00E-05	2,05E-02	2,41E-07	4,10E-04
775	2,12E-05	1,45E-02	1,83E-07	3,11E-04
780	1,50E-05	1,02E-02	1,39E-07	2,36E-04
785	1,06E-05	7,24E-03	0,00E+00	0,00E+00
790	7,47E-06	5,10E-03	0,00E+00	0,00E+00
795	5,26E-06	3,59E-03	0,00E+00	0,00E+00
800	3,70E-06	2,53E-03	0,00E+00	0,00E+00

Anexo II – Relatório da medição no dia 6/11/2012 segundo o formato do relatório teste do Anexo A da norma EN13201-4

A. Informação geral

Nome do local	Nó de auto-estrada Évora Poente
Data da medição	6/11/2012
Período da medição	17:30 até às 20:00
Nome das pessoas que participaram na medição	Ricardo Leandro
	Fernando Castro

B. Dados geométricos do local em estudo



C. Dados do pavimento da estrada

Tipo do pavimento da estrada	Ligeiramente polido – R3
Ano do pavimento	1998
Observações das condições do pavimento	Excelente

D. Dados da lâmpada e luminária

Local A e Local B – Tipo 1		
Luminária	Identificação	HADASA M250A/H
	Eficiência óptica (%)	80,6
	Inclinação (°)	5
	Altura da instalação (m)	12
	Ano da armadura	2007
	Ano do poste	1998
	Refractor/Difusor	Vidro borosilicatado prismático
Lâmpada	Tipo de distribuição da luz	Tipo II
	Tipo	Master Son-T PIA Hg-Free – Vapor de Sódio Alta Pressão (VSAP) [41]
	Potência (W)	250
	Ano	2007
	Número	36
	Balastro	Ferromagnético
	Redução de fluxo luminoso	Não

E. Fornecimento de eletricidade

Sistema Trifásico	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Tensão média durante o período de medição (V_{rms}) (V)	235,4±0,53	235,1±0,48	235,0±0,48
Menor Tensão média durante o período de medição (V_{rms}) (V)	234,4	234,3	234,2
Corrente média durante o período de medição (I_{rms}) (A)	59,0±0,94	57,4±0,72	52,7±0,76
Menor Corrente média durante o período de medição (I_{rms}) (A)	56,7	55,8	51,9
Fator de Potência médio	0,93±0,004	0,94±0,002	0,90±0,003

F. Condições ambientais

Condições ambientais	Início das medições	Final das medições
Tempo	Céu limpo	Céu limpo
Temperatura (°C)	15	13
Pavimento da estrada (húmido, molhado ou seco)	Seco	Seco

G. Condições da instalação

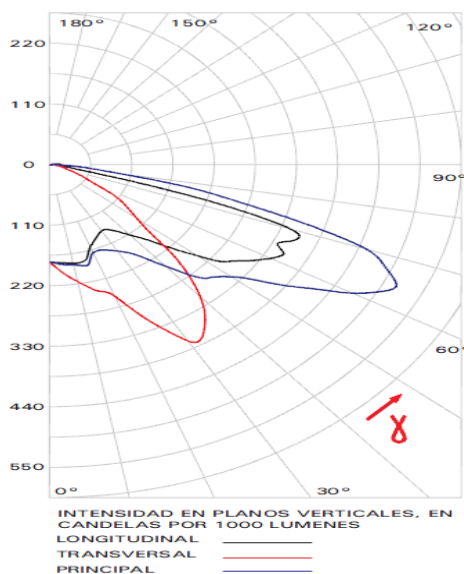
Geometria da instalação	Iluminação de Nó de auto-estrada
Iluminação ambiente	Rural
Estado de manutenção das luminárias	Excelente
Obstrução à luz	Inexistente

H. Instrumentos de medição

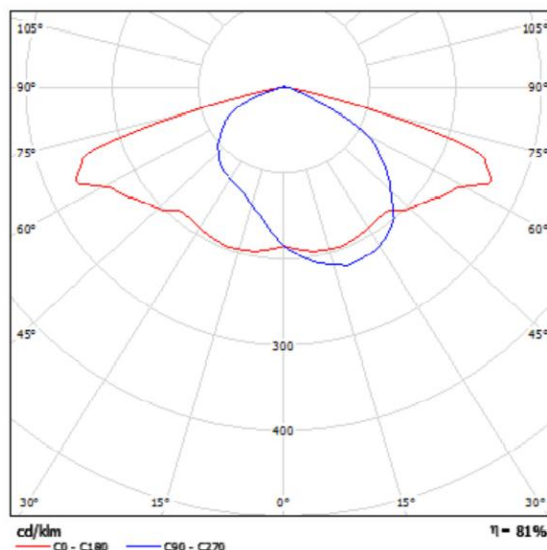
Tipo de medidor	Modelo
Analizador de potência	C.A 8332
Luxímetro Digital	LDR-208

**Anexo III – Curvas de distribuição da intensidade luminosa (cd) da luminária
HADASA M250A/H e Philips SGS253 GB**

HADASA M250A/H



Philips SGS253 GB



Anexo IV – Distribuição da iluminância medida na área relevante analisada do Local A para a Luminária VSAP_a

Distância Transversal (m)	11	5	5	5	3	2	3	5	6	6	5
	7,5	15	15	11	5	5	6	12	14	15	15
	3,8	26	26	15	7	9	10	19	23	24	25
	0	28	23	23	21	12	11	12	18	22	27
		0	2,8	8,4	14,1	19,7	25,3	30,9	36,6	42,2	45
		Luminária	Distância Longitudinal (m)								Luminária

Anexo V – Distribuição da iluminância calculado na área relevante analisada do Local A para a Luminária VSAP_b*

Distância Transversal (m)	10,5	11	10	9,02	8,22	7,69	7,69	8,22	9,02	10	11
	7,5	17	16	13	11	9,48	9,48	11	13	16	17
	4,5	23	20	16	12	10	10	12	16	20	23
	1,5	28	20	15	11	9,21	9,21	11	15	20	28
		2,3	6,8	11,3	15,8	20,3	24,8	29,3	33,8	38,3	42,8
		Luminária	Distância Longitudinal (m)								Luminária

Anexo VI – Distribuição da iluminância medida na área relevante analisada do Local B para a Luminária VSAP_a

Distância Transversal (m)	8	-----	10	11	8	4	2	1	1	0	1	1	1	1	3	8	8	11	-----
	2	-----	28	24	21	11	8	4	3	2	2	2	4	5	9	18	21	23	-----
	0	-----	29	23	18	11	6	5	3	2	1	2	4	6	11	16	20	22	-----
		0	2,8	8,4	14,1	19,7	25,3	30,9	36,6	42,2	47,8	53,4	59,1	64,7	70,3	75,9	81,6	87,2	90
		Luminária	Distância Longitudinal (m)																Luminária

Anexo VII – Distribuição da iluminância calculada na área relevante analisada do Local B para a Luminária VSAP_b*

Distância Transversal (m)	8	-----	14	12	8,57	5,52	3,71	2,44	1,58	1,16	1,16	1,58	2,44	3,71	5,52	8,58	12	14	-----
	3	-----	25	17	11	6,11	3,87	2,33	1,46	1	1	1,46	2,33	3,87	6,11	11	17	25	-----
	1	-----	27	16	9,72	5,56	3,55	2,11	1,33	0,9	0,9	1,33	2,11	3,55	5,56	9,72	16	27	-----
	0		2,8	8,4	14,1	19,7	25,3	30,9	36,6	42,2	47,8	53,4	59,1	64,7	70,3	75,9	81,6	87,2	90
		Luminária	Distância Longitudinal (m)																




Anexo VIII – Síntese dos parâmetros necessários para avaliação dos custos do sistema de iluminação através do método de análise do custo do ciclo de vida da recomendação CIE115:2010

Parâmetros utilizados	Valores considerados – Local A	Valores considerados – Local B
Custo da instalação, Cin (€/m)	53,64	42,64
Custo da coluna e fundição, Cco (€/unid)	250	250
Custo da luminária e primeira lâmpada, Clu (€/unid)	370	370
Custo da rede elétrica, Cps (€/m)	26,08	26,08
Número de colunas, m	2	3
Número de luminárias, n	2	2
Espaçamento entre colunas, S (m)	45	90
Custo de operação, Cop (€/m)	5,14	2,57
Tempo anual de funcionamento da iluminação, t1 (h/ano)	4013	4013
Tempo de vida da lâmpada para 12 000h, t2 (anos)	3	3
Potência da luminária, Plu (kW)	0,277	0,277
Custo da energia, Cen (€/kW)	0,0633	0,0633
Custo da substituição conjunta das lâmpadas, Cgr (€/unid)	100	100
Custo da substituição individual da lâmpada, Cir (€/unid)	50	50
Número estimado de substituição individual de lâmpadas por ano, q (unid/ano)	0,24	0,24
Custos fixos da coluna, Cfi (€)	0	0
Número de colunas, m	2	3
Número de luminárias, n	2	2
Espaçamento entre colunas, S (m)	45	90
Custo do ciclo de vida, Caa (€/m)	13,60	8,06
Número de anos de serviço do sistema de iluminação, t (anos)	20	20
Taxa de juro aplicada, i (%/100)	0,05	0,05
Taxa de crescimento anual do Cop, iop (%/100)	0,03	0,03
Custo da instalação, Cin (€/m)	53,64	42,64
Custo de operação, Cop (€/m)	5,14	2,57
Fator de recuperação de capital, CRF	0,087	0,087
Fator de crescimento, Gf	1,8	1,8

Anexo IX – Balastro eletrónico ECOLUM



DADOS TÉCNICOS - TECHNICAL DATA

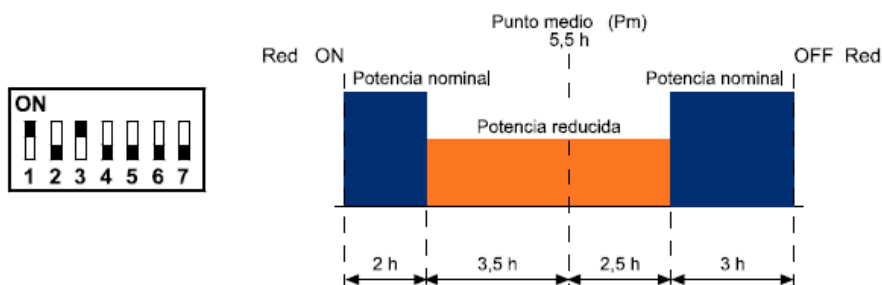
Referência- Reference			EC4-50	EC4-70 	EC4-100 	EC4-150 	EC4-250D
Lâmpada Lamp	HPS	W	50	70	100	150	250
Tensão de referência Design voltage		Vac	230				
Limite de Tensões Voltage range		Vac	190 - 253				
Frequência de rede Mains frequency		Hz	50 - 60				
Intensidade nominal Nominal current @ 230 V		A	0,25	0,31	0,44	0,66	1,10
Potência em rede Mains power	Potência nominal Nominal power	W	55 ± 2	70 ± 2	100 ± 2	150 ± 2	250 ± 2
	Potência reduzida Reduced power	W	40 ± 2	52 ± 2	60 ⁺⁴ ₋₂	90 ⁺⁴ ₋₂	150 ⁺⁴ ₋₂
Tensão de Acendimento Ignition voltage Up		kV	2,3		3,5		
Factor de potência Power factor		λ	0,96		0,97	0,98	
Freq. funcionamento Operating frequency (1)	Potencia nominal Nominal power	kHz	5 5			5 0	70
	Potencia reduzida Reduced power	kHz	70			6 0	90
Temperatura máx. permitida Rated max. temperature tc		°C	75		80		
Limites de temperatura Temperatura range ta		°C	-20 ... +55		-20 ... +60	-20 ... +55	
Comprimento máx. cabos de lâmpada Max. length lamp wires		m	2 - 5				
Índice de Protecção IP IP protection			IP 20 (Balasto para incorporar / Built-in ballast)				

Anexo X – Princípio de funcionamento do temporizador programado do balastro eletrónico

Temporización por programa		S2 S4	(Reducción antes del punto medio)	
<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>2,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>3 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>3,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>4 h</div>	
<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>4,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>5,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>6 h</div>	

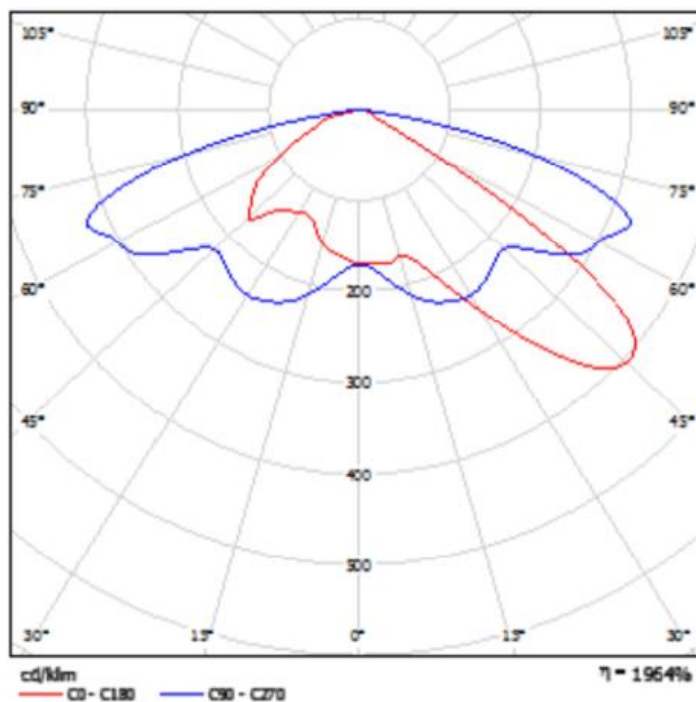
Mediante los switches S5 a S7 se establece el tiempo de reducción *después* del punto medio:

Temporización por programa		S5 S7	(Reducción después del punto medio)	
<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>2,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>3 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>3,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>4 h</div>	
<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>4,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>5,5 h</div>	<div><div>ON</div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div>1 2 3 4 5 6 7</div></div></div> <div>6 h</div>	

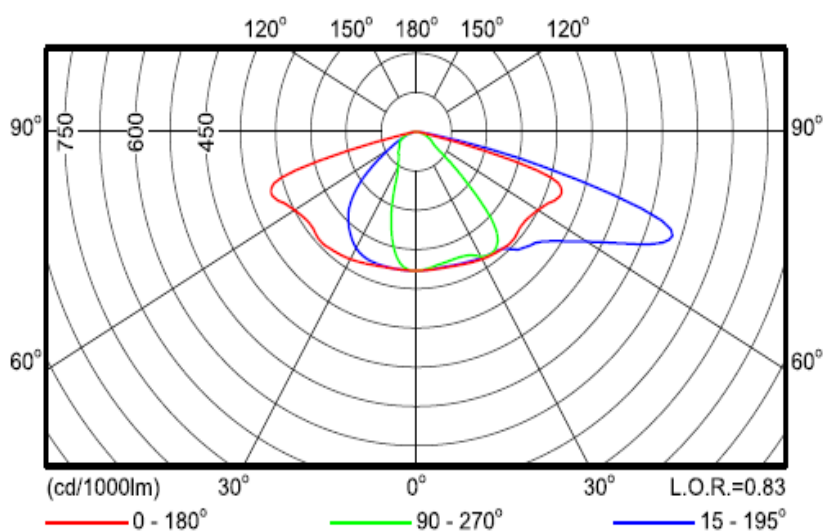


**Anexo XI – Curvas de distribuição da intensidade luminosa (cd) da luminária
LED_a e LED_b**

LED_a



LED_b



Anexo XII – Driver *Integrated Dynadimmer Philips* para luminárias LED

